



Contribution à la ré-identification de véhicules par analyse de signatures magnétiques tri-axiales mesurées par une matrice de capteurs

Anne-Cecile Pitton

► To cite this version:

Anne-Cecile Pitton. Contribution à la ré-identification de véhicules par analyse de signatures magnétiques tri-axiales mesurées par une matrice de capteurs. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Grenoble Alpes, 2015. Français. NNT : 2015GREAT005 . tel-01143167

HAL Id: tel-01143167

<https://theses.hal.science/tel-01143167>

Submitted on 16 Apr 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Signal, Image, Parole, Télécoms**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Anne-Cécile PITTON

Thèse dirigée par **Sylvie CHARBONNIER**
co-encadrée par **Andréa VASSILEV**

préparée au sein du **Laboratoire CEA / Leti**
dans l'**École Doctorale EEATS « Électronique, Électrotechnique, Automatique, Traitement du signal »**

Contributions à la Ré-Identification de Véhicules par Analyse de Signatures Magnétiques Tri-Axiales mesurées par une Matrice de Capteurs

Thèse soutenue publiquement le **15 janvier 2015**,
devant le jury composé de :

Pr. Nouredine ZERHOUNI

Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques de Besançon,
Rapporteur

Pr. Moamar SAYED MOUCHAWEH

Ecole des Mines de Douai, Rapporteur

Pr. Pierre BEAUSEROY

Université Technologique de Troyes, Examineur

Pr. Christophe BERENGUER

GIPSA-Lab, Grenoble-INP, Président du Jury et Examineur

Dr. Sylvie CHARBONNIER

GIPSA-Lab, Université Joseph Fourier, Directrice de thèse

M. Andréa VASSILEV

CEA / Leti, Co-encadrant de thèse

*Université Joseph Fourier / Université Pierre Mendès France /
Université Stendhal / Université de Savoie / Grenoble INP*



A Papa, pour m'avoir communiqué sa passion pour les sciences,

A Maman, pour m'avoir offert du temps pour mes études,

A Phut & Thérèse, partis bien trop tôt,

A Minh, et à tous nos « à venir » !

Remerciements

Après plus de cinq années passées sur ce projet ambitieux de thèse de doctorat, il est temps de remercier ceux qui ont contribué à le rendre possible, en essayant de n'oublier personne (exercice difficile !).

Un grand merci tout d'abord aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer mes travaux et qui ont pour certains fait le déplacement jusqu'à Grenoble :

Pr. Christophe BERENGUER, de Grenoble-INP, Président de ce jury,

Pr. Noureddine ZERHOUNI, de l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques de Besançon, et Pr. Moamar SAYED MOUCHAWEH, de l'Ecole des Mines de Douai, Rapporteurs de cette thèse,

Pr. Pierre BEAUSEROY, de l'Université Technologique de Troyes,

Dr. Sylvie CHARBONNIER, de l'Université Joseph Fourier de Grenoble,

M. Andréa VASSILEV, du CEA-Leti de Grenoble.

Merci à tous pour vos questions éclairées, pour votre bienveillance et pour avoir plongé avec moi dans le magnétisme des véhicules.

Je remercie tout particulièrement Sylvie, ma directrice de thèse, pour ses conseils méthodologiques, son expérience des travaux de recherche et son recul qui m'ont été indispensables. Merci également à Andréa, co-encadrant de thèse, pour sa connaissance des traitements associés aux capteurs magnétiques. Merci à tous les deux pour m'avoir soutenue jusqu'au bout malgré les obstacles.

Cette thèse s'est déroulée au sein du CEA-Leti : je remercie donc Roland BLANPAIN, à la tête du département DSIS, Sébastien DAUVE, chef du service SCSE, et Stéphanie RICHE, chef du laboratoire LSCM, de m'y avoir accueillie. Stéphanie, merci notamment pour ton écoute et ton analyse de ma zone de confort.

Toute ma reconnaissance au Pr. Jean-Louis LACOUME pour m'avoir permis d'aborder la problématique de ma thèse sous un angle nouveau, ayant abouti au Chapitre VI.5 de ce mémoire. Je vous souhaite de continuer à ouvrir les yeux des doctorants du CEA-Leti !

Merci à Christian COMMAULT et Gang FENG de l'Ecole Doctorale EEATS pour m'avoir fait confiance en autorisant mes nombreuses réinscriptions. Co-organiser les Journées des Doctorants à vos côtés aura été un honneur et un vrai plaisir.

Merci à mon employeur actuel, Sopra Steria, pour sa compréhension, à mes collègues de ces deux dernières années pour leur appui et leur bonne humeur, et surtout à Claude BAUD qui a fait de cette thèse un objectif professionnel.

J'adresse ensuite toute ma gratitude à mes collègues venus conduire leurs voitures au-dessus des capteurs magnétiques par de froides journées d'hiver : François ALCOUFFE (merci pour ton aide lors des manips avec l'OROS et pour Herbey's), Hubert BASSEVILLE, Malvina BILLERES, Viviane

CATTIN (merci pour ton expérience des signatures de véhicules), Jean-Jacques CHAILLOUT, Norbert DANIELE, François FAVRE-REGUILLON (merci pour les Star Watch !!), Jean-Philippe GROS, Claire GUYON-GARDEUX, Roger HUC, Jean-François MAINGUET, Marco RANIERI, Antoine ROBINET, Franck VIAL, Audrey VIDAL (merci pour les mesures de bruits magnétiques des parkings du CEA) et Jean-Charles VIDAL (encore désolée pour ta roue), ainsi qu'un des conducteurs des bus du CEA. Merci également à Angelo GUIGA pour son sens pratique et sa maîtrise de la mécanique qui ont permis de donner vie à certains montages expérimentaux, et à Philippe KLEIN pour son aide concernant les capteurs magnétiques. Sans vous, je n'aurais jamais eu de signaux à traiter, et sans signaux, pas de thèse !

Une pensée particulière pour Jean-Jacques, qui m'a épaulée pendant la longue phase de la rédaction du mémoire, et pour Jean-Charles, qui a été compagnon de mon infortune pendant ces trois années au CEA (« soyons forts ! »).

Merci à Cécile CONRY pour sa disponibilité et son expertise dans le domaine du Génie Civil, lors de la phase de définition du démonstrateur, ainsi qu'à Gérard GIBON et Bruno CHARRAT. J'ai été contente d'apprendre que ce démonstrateur avait finalement pu être installé au CEA après mon départ.

En complément des collègues déjà cités, je tiens de plus à remercier les personnes suivantes pour leurs conseils en électronique, en magnétisme et/ou traitement du signal, ou tout simplement pour leur accueil et leur sympathie dans la vie de tous les jours au labo (le rhombicuboctaèdre est-il toujours multicolore ?) : Marc B., Rim B., Sébastien B., Bertrand C., Bruno C., Mikael C., Benoît D., Denis D., Ghislain D., Jean-Louis D., Maxime D., Tony D., Bruno F., François F., Bernard G., Christelle G., Pierre G., Sahar G., Mathieu H., Tristan H., Christian J., Fabien J., Laurent J., Sylvain J., Thomas J., Alexis L.G., Philippe L., Rouba N., Jean-Benoît P., Jérôme P., Virginie P., Pascale R., Nathalie S., Nawres S., Patrick S., Aurélie T., Rémy T., et Christophe V. (mea culpa à ceux que j'aurais omis).

Merci à tous ceux, famille, amis, anciens collègues, qui ont pu se libérer pour assister à ma soutenance, ça a été une très agréable surprise !

Enfin, un gigantesque MERCI à mes parents et à mon mari Minh, ainsi qu'à mes amies Audeline, Laure, et Linh Lan, pour leur implication et leurs encouragements tout au long de cette thèse ! Merci pour les relectures, les traductions, les recherches documentaires, les pistes de réflexion, les pré-manips le jour de l'an, les constructions de tours amagnétiques en K'Nex, les conseils en informatique, les fous rires, le pot de thèse, ... Merci d'y avoir cru, cette réussite est vraiment collective, car c'est grâce à vous que j'ai pu trouver l'énergie nécessaire pour clore ce chapitre malgré les épreuves de la vie.

Minh, merci d'être là, merci pour ton soutien au quotidien, merci de me rendre plus forte.

On l'a fait !

Notations

Acronymes

AMR	Magnéto-résistance anisotrope
ARCEP	Autorité de Régulation des Communications Electroniques et des Postes
ASFA	Association des Sociétés Françaises d'Autoroute
BP	Bande Passante
CLAP	Caméras à Lecture Automatique de Plaque d'immatriculation
CNIL	Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés
COR (Courbe)	Caractéristique Opérationnelle de Réception
CPA	Closest Point of Approach
DB	Densité de Bruit
DTW	Dynamic Time Warping
EO	Est vers Ouest
GMR	Magnéto-résistance géante
GPS	Global Positionning System
INSEE	Institut National de la Statistique et des Études Économiques
ITS	Intelligent Transportation Systems (Systèmes de transport intelligents)
MAC (Adresse)	Media Access Control : identifiant physique stocké dans une carte réseau ou une interface réseau similaire
MOD	Matrice Origine-Destination
NS	Nord vers Sud
OE	Ouest vers Est
PIB	Produit Intérieur Brut
PIP	Perceptually Important Points (Points significatifs)
RFID	Radio Frequency IDentification
SN	Sud vers Nord

Unités

A	Ampère
h	heure
Hz	Hertz
m	mètre
mph	Miles per hour / Miles par heure
T	Tesla
V	Volt
vh	Véhicule

Symboles

α	Paramètre de régularisation de Tikhonov
\vec{B} (B_x, B_y, B_z)	Champ magnétique d'induction (abrégé en Champ magnétique) sur les axes X, Y, Z
$\vec{B}_{ind}, \vec{B}_{perm}$	Champ magnétique induit, Champ magnétique permanent
$\vec{B}_{inv}, \vec{B}_{var}$	Champ magnétique variant, Champ magnétique invariant
\vec{B}_{mod}	Champ magnétique modélisé
\vec{B}_{Ter}	Champ magnétique terrestre
\vec{B}_{vh}	Champ magnétique généré par un véhicule
BD	Pourcentage de Bonnes Détections
\vec{c}_j	Position tridimensionnelle absolue du j-ième capteur dans le repère des capteurs
C_{S1S2}	Intercorrélation entre S1 et S2
capt	Capteur
$Corr_x, Corr_y, Corr_z$	Intercorrélation sur l'axe X, Y, Z

D	Distance
Deb	Débit
decX, decY	Décalage spatial selon X, selon Y
\vec{d}_l	Position tridimensionnelle absolue du l-ième dipôle dans le repère des capteurs
$d\vec{l}$	Déplacement infinitésimal
$\Delta d, \Delta x, \Delta y$	Distance spatiale entre deux capteurs, Distance spatiale sur l'axe X, sur l'axe Y
Δt	Intervalle de temps
F, F_{\max}	Fréquence, Fréquence maximale
FA	Pourcentage de Fausses Alarmes
$F_e, F_{e_{\min}}$	Fréquence d'échantillonnage, Fréquence d'échantillonnage minimum
G	Matrice décrivant le modèle dans un problème inverse linéaire
\vec{H}	Champ d'excitation magnétique
\vec{H}_c, \vec{H}_d	Champ d'excitation coercitif, Champ d'excitation démagnétisant
$\vec{H}_{\text{ext}}, \vec{H}_{\text{int}}$	Champ d'excitation externe, Champ d'excitation interne
I	Intensité du courant
Id	Matrice identité
i, j, k, n	Nombres entiers (dans \mathbb{Z}) permettant de parcourir des ensembles discrets
χ	Susceptibilité du matériau
$\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$	Respectivement plus petite et plus grande valeurs singulières de G
\vec{M} (Mx, My, Mz)	Aimantation
$\vec{M}_{\text{ind}}, \vec{M}_{\text{perm}}, \vec{M}_r$	Aimantation induite, Aimantation permanente, Aimantation rémanente
M_s	Aimantation à saturation
\vec{m} (mx, my, mz)	Moment magnétique sur les axes X, Y, Z
\vec{m}_l	Moment tridimensionnel magnétique du l-ième dipôle dans le repère des capteurs
μ_0	Perméabilité du vide
N	Nombre d'échantillons d'un signal numérique
N_c	Nombre de capteurs
N_d	Nombre de dipôles
v	Constante de Rayleigh
PE	Pourcentage d'Erreur
\vec{p}	Vecteur des paramètres dans un problème inverse
\vec{p}_{MCO}	Vecteur des paramètres au sens des Moindres Carrés Ordinaires dans un problème inverse
R	Résolution du capteur
\vec{r}	Vecteur d'observation tridimensionnel reliant un dipôle à un capteur
r	Distance entre dipôle et capteur
\vec{r}_{lj}	Vecteur d'observation tridimensionnel reliant le dipôle l au capteur j
\vec{S}_1, \vec{S}_2	Signature magnétique 1, Signature magnétique 2
σ	Ecart-type (racine carrée de la variance)
T_{dist}	Seuil sur une distance
T_e	Période d'échantillonnage
T_{simi}	Seuil sur une similitude
t	Instant de mesure
τ	Décalage temporel continu
\vec{u}_t	Vecteur unitaire du champ magnétique terrestre
v	Vitesse
vol	Volume
\vec{w}	Vecteur des mesures dans un problème inverse
\vec{w}_{mod}	Vecteur des mesures modélisées dans un problème inverse

REMERCIEMENTS	5
NOTATIONS.....	7
ACRONYMES.....	7
UNITES	7
SYMBOLES	7
I. INTRODUCTION	13
II. TRAFIC ROUTIER, CONTEXTE ET ENJEUX.....	15
II.1 GESTION DE TRAFIC ROUTIER – ENJEUX.....	15
II.2 BESOINS DES GESTIONNAIRES DE TRAFIC	16
II.2.a Données de trafic nécessaires aux gestionnaires	16
II.2.b Principe et apports de la ré-identification de véhicules	16
II.2.c Conclusion	18
II.3 TECHNOLOGIES ACTUELLEMENT UTILISEES POUR RE-IDENTIFIER DES VEHICULES.....	18
II.3.a Ré-identification avec équipement préalable des véhicules.....	18
II.3.a.1 Ré-identification par suivi de la position du véhicule.....	18
II.3.a.2 Ré-identification par identification du véhicule en des points fixes	19
II.3.b Ré-identification potentielle de tous les véhicules	20
II.3.b.1 Capteurs non-intrusifs (hors chaussée).....	20
II.3.b.2 Capteurs intrusifs (dans la chaussée).....	21
II.3.c Conclusion	21
II.4 RE-IDENTIFIER AVEC DES CAPTEURS MAGNETIQUES	22
II.4.a Avantages des capteurs magnétiques	22
II.4.b Systèmes magnétiques existants	23
II.5 POSITIONNEMENT DE NOTRE ETUDE.....	25
III. SIGNATURES MAGNETIQUES ET RE-IDENTIFICATION.....	27
III.1 INTRODUCTION AU MAGNETISME	27
III.1.a Définitions	27
III.1.b Matériaux magnétiques	29
III.1.c Aimantation à plus petite échelle	30
III.1.d Aimantation permanente et aimantation induite	31
III.2 SIGNATURES MAGNETIQUES DES VEHICULES.....	32
III.3 CHOIX DU CAPTEUR MAGNETIQUE	36
III.3.a Caractéristiques du signal mesuré	36
III.3.b Principales familles de micro-magnétomètres.....	37
III.4 CONCLUSION	39
IV. SIGNATURES DE VEHICULES – DONNEES EXPERIMENTALES	41
IV.1 UNE MATRICE DE CAPTEURS MAGNETIQUES	41
IV.2 CONFIGURATION DE JANVIER 2011	42
IV.3 CONFIGURATION DE MARS 2012	43
IV.4 ACQUISITION DES SIGNATURES MAGNETIQUES.....	45
IV.4.a Calibration des capteurs	45
IV.4.b Chaîne de prétraitements des signatures temporelles.....	46
IV.5 CONCLUSION	49

V.	RE-IDENTIFICATION DE VEHICULES PAR COMPARAISON DIRECTE DES SIGNATURES TEMPORELLES ET SPATIALES.....	51
V.1	INTRODUCTION	51
V.2	DISTANCES ENTRE SIGNATURES	52
V.2.a	Prétraitements : d'une signature temporelle à une signature spatiale	53
V.2.b	Etat de l'art des transformations des signaux avant comparaison	56
V.2.c	Calcul de distances entre signatures.....	57
V.2.c.1	Maximum d'intercorrélation entre signatures temporelles.....	57
V.2.c.2	Algorithme DTW entre signatures temporelles	59
V.2.c.3	Comparaison d'extrema (PIP) entre signatures temporelles	61
V.2.c.4	Distance euclidienne entre signatures spatiales.....	63
V.3	METHODE D'EVALUATION DES PERFORMANCES	65
V.3.a	Histogrammes des distances et seuil de détection	65
V.3.b	Courbes de détection.....	68
V.4	RESULTATS	71
V.4.a	Comparaison de toutes les méthodes choisies	71
V.4.b	Influence de l'orientation du véhicule	76
V.4.c	Influence de l'accélération du véhicule.....	78
V.4.d	Influence du décalage latéral.....	83
V.4.e	Méthode de ré-identification proposée et conclusions	86
VI.	RE-IDENTIFICATION DE VEHICULES VIA UNE MODELISATION MAGNETIQUE.....	89
VI.1	INTERET D'UNE MODELISATION MAGNETIQUE DU VEHICULE.....	89
VI.2	MODELISER UN VEHICULE A L'AIDE DE DIPOLES MAGNETIQUES	91
VI.2.a	Signature magnétique d'un dipôle	91
VI.2.b	Première modélisation quantitative de véhicules civils	92
VI.2.c	Le dipôle magnétique comme modèle élémentaire d'un objet magnétique	94
VI.2.d	Modélisation d'un véhicule avec quelques dipôles.....	96
VI.3	RESOLUTION D'UN PROBLEME INVERSE.....	98
VI.3.a	Problème direct et problème inverse	98
VI.3.b	Résoudre un problème inverse linéaire.....	100
VI.3.b.1	Régularisation de Tikhonov.....	102
VI.3.b.2	Régularisation par troncature de spectre	103
VI.3.c	Résoudre un problème inverse non linéaire.....	104
VI.4	ETAT DE L'ART – MODELISATION D'OBJETS MAGNETIQUES PAR UNE DISTRIBUTION DE DIPOLES	108
VI.4.a	Un unique dipôle sans distinction induit / permanent	108
VI.4.b	Un unique dipôle avec distinction induit / permanent	114
VI.4.c	Plusieurs dipôles sans distinction induit / permanent.....	118
VI.4.d	Plusieurs dipôles avec distinction induit / permanent.....	120
VI.4.e	Récapitulatif	122
VI.5	RE-IDENTIFICATION DE VEHICULES VIA UN PROBLEME INVERSE LINEAIRE	124
VI.5.a	Choix du maillage de dipôles.....	124
VI.5.b	Choix du maillage de capteurs et conditionnement associé	131
VI.5.c	Mise en place d'une régularisation et ses conséquences	133
VI.5.d	Performances de ré-identification avec régularisation	138

VI.5.d.1	Calcul de distances entre deux distributions dipolaires	139
VI.5.d.2	Influence du maillage de capteurs sur l'axe latéral et du nombre de plans dipolaires considérés	141
VI.5.d.3	Influence de l'orientation du véhicule et translations des plans dipolaires sur X et Y	146
VI.5.d.4	Simulation de décalage latéral	149
VI.5.e	Comparaison des performances des deux méthodes de ré-identification proposées	156
VI.5.f	Méthode de ré-identification proposée et conclusions	159
VII.	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	161
VIII.	ANNEXES	167
VIII.1	EXPRESSION DU CHAMP MAGNETIQUE GENERE PAR UN DIPOLE DANS LE CAS D'UN PROBLEME INVERSE LINEAIRE	167
VIII.2	RE-IDENTIFICATION VIA UNE MODELISATION MAGNETIQUE - SIMULATION DE DECALAGE LATERAL SUR DONNEES REELLES	169
IX.	BIBLIOGRAPHIE	177

I. Introduction

Avec l'augmentation de la population mondiale associée à une généralisation des véhicules particuliers, les embouteillages, ou « congestions de trafic », ont fortement augmenté ces dernières années. Ces congestions entraînent de nombreuses nuisances, qui ont un impact économique, écologique et social, et dont le coût est évalué à plus de 100 milliards d'euros par an à l'échelle européenne.

Des méthodes de gestion dynamique du trafic sont de plus en plus développées dans le but de fluidifier le trafic. Cependant, une gestion dynamique nécessite d'obtenir des données sur l'état du trafic en temps réel. Nous avons donc recensé les besoins des équipes de recherche en gestion de trafic, et il apparaît un manque de données pour valider leurs modèles, et en particulier de données ne pouvant être obtenues qu'en « ré-identifiant » un véhicule.

Ré-identifier un véhicule consiste à détecter la présence d'un véhicule donné en différents points fixes situés sur une route. Une des données de trafic découlant de cette ré-identification est l'estimation du temps de parcours pour aller d'un point A à un point B. La ré-identification repose sur la comparaison d'identifiants du véhicule, comme par exemple sa plaque d'immatriculation. Si les plaques d'immatriculation mesurées au point A et au point B sont détectées comme identiques, alors le système considère avoir ré-identifié le même véhicule.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons choisi d'utiliser comme identifiants les signaux mesurés lors du passage de véhicules au-dessus de capteurs de champ magnétique placés au niveau de la chaussée. Ces signaux sont appelés « signatures magnétiques », et sont générés par l'aimantation des véhicules. Leurs principaux avantages face aux autres identifiants disponibles sont l'accès à une ré-identification sur quelques kilomètres de tous les véhicules tout en respectant la vie privée des conducteurs, le faible coût des capteurs utilisés, et la possibilité d'être mesurées quelles que soient les conditions climatiques.

Toutefois, l'utilisation de ces signatures magnétiques présente plusieurs verrous. La signature pourrait tout d'abord varier en fonction de l'orientation du véhicule par rapport au Nord magnétique terrestre, ou de son inclinaison par rapport au plan horizontal : il risque alors de ne plus être possible de ré-identifier un véhicule aux points A et B si son orientation a changé entre ces deux points. En effet, l'aimantation qui génère la signature est susceptible d'être induite par le champ magnétique externe qui s'applique sur le véhicule : si ce champ varie (ce qui est le cas quand le véhicule tourne), alors l'aimantation variera, et la signature magnétique également.

Si l'aimantation induite est non seulement présente, mais dominante, alors la part d'aimantation qui ne dépend pas du champ externe, appelée l'aimantation permanente, sera relativement faible. Or c'est ce type d'aimantation qui permet de distinguer deux véhicules de même marque et de même modèle, et qui est donc nécessaire pour une application de ré-identification.

Ajoutons enfin que le champ magnétique généré par un objet aimanté dépend de la position de cet objet par rapport aux capteurs magnétiques. Ainsi, la signature du véhicule risque de varier en fonction de sa position latérale sur la chaussée : si le véhicule a roulé sur la partie gauche de la

chaussée au point A, et sur la partie droite au point B, il y a alors un « décalage latéral » du véhicule entre les points A et B, et ce décalage pourrait entraîner une non-ré-identification du véhicule.

Dans cette thèse, notre objectif est de concevoir et d'optimiser un système de ré-identification de véhicules à partir de matrices de capteurs magnétiques enfouies dans la chaussée. Compte-tenu du constat précédent, les performances de ce système devront être évaluées en fonction de l'orientation du véhicule et en fonction de son décalage latéral entre les deux points de mesure. Le nombre de capteurs nécessaire pour atteindre les performances décrites devra aussi être étudié.

Dans une première partie, nous présentons plus en détails le contexte et les enjeux de cette thèse, en précisant quelles technologies existent actuellement pour ré-identifier des véhicules, ainsi que le positionnement de notre étude par rapport à l'existant.

Le chapitre suivant est consacré à la compréhension physique de l'origine des signatures magnétiques. A partir de la connaissance de ces signaux, nous pouvons alors justifier le choix des capteurs magnétiques utilisés pour réaliser des campagnes de mesures.

Nous décrivons ensuite les données expérimentales obtenues lors de ces campagnes de mesures. En effet, des signatures réelles de véhicules étaient nécessaires pour étudier les performances des algorithmes de ré-identification proposés dans cette étude, car il n'existe actuellement pas de modèle reconnu permettant de les simuler.

Nous présentons tout d'abord une méthode de ré-identification de véhicules par comparaison directe de paires de signatures magnétiques mesurées par les capteurs. Les calculs de distances entre les paires sont effectués avec des algorithmes classiques comme la distance euclidienne. Nous expliquons comment les performances de la méthode sont évaluées, puis nous exposons les résultats obtenus en fonction de différents paramètres, comme l'orientation du véhicule et son décalage latéral sur la chaussée.

Dans un second temps, nous proposons une méthode de ré-identification qui transforme les signatures avant d'effectuer leur comparaison. A partir des signatures, nous remontons en effet à une modélisation des véhicules, et ce sont les paires de modèles qui sont comparées. L'idée de cette modélisation est d'arriver à s'affranchir du décalage latéral du véhicule, et donc à ne plus être sensible aux déformations des signatures dues à ce décalage.

II. Trafic routier, contexte et enjeux

II.1 Gestion de trafic routier – Enjeux

La population mondiale a atteint les 6.9 milliards d'habitants en 2010, soit une multiplication par 2.7 depuis 1950 (Source INSEE). En parallèle, les véhicules particuliers se sont généralisés depuis la fin du XXème siècle dans le monde entier, et l'on s'attend en 2050 à un triplement du parc automobile en l'espace de 50 ans, dû en particulier aux pays en voie de développement (Figure 1). En effet, en Europe, le nombre de véhicules pour 1000 habitants stagne à 500 ou 600 depuis 2003, tandis qu'en Chine, il est passé de 15 en 2003 à 58 en 2010, ce qui laisse encore une grande marge d'évolution (Source International Road Federation – World Road Statistics). Par conséquent, les embouteillages, appelés également congestions de trafic, ont fortement augmenté ces dernières dizaines d'années [ROD06].

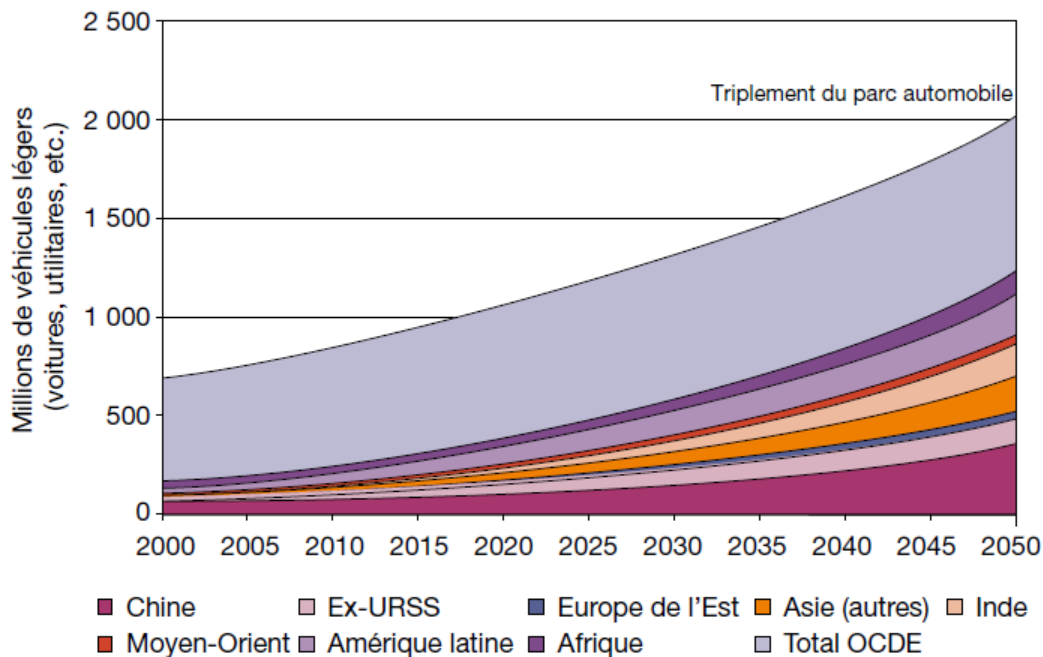


Figure 1 – Motorisation mondiale : projection du WBCSD (World Business Council for Sustainable Development) [CEN10]

Or ces congestions ont un impact économique, écologique et social, dont le coût était évalué en 2006 à l'échelle de l'Europe à 1% du produit intérieur brut (PIB) européen [COM07], soit environ 120 milliards d'euros (Source Eurostat, Office statistique de l'U.E.). En effet, les congestions immobilisent des travailleurs, entraînent des retards dans les livraisons, et contribuent à épuiser les ressources de pétrole. De plus, le secteur du transport routier est le deuxième producteur mondial d'émissions de CO₂ (18% en 2003) derrière les industries du secteur de l'énergie (45% en 2003) [CEM07]. Les congestions participent à l'augmentation de ces émissions, alors que l'Union Européenne s'est engagée en 2009 à réduire les gaz à effet de serre, qui contribuent au réchauffement climatique, de 20% en 2020 par rapport aux niveaux de 1990 [EUR09]. Enfin, les congestions de trafic augmentent les risques d'accidents de circulation.

Pour réduire ces congestions, il faut soit construire de nouvelles infrastructures, ce qui n'est pas toujours possible pour des raisons de coût ou de place disponible, soit utiliser au mieux les capacités disponibles du réseau routier, en améliorant et optimisant la gestion du trafic.

II.2 Besoins des gestionnaires de trafic

Aujourd'hui, les « systèmes de transport intelligents » (ITS), et en particulier les méthodes de gestion dynamique du trafic, sont de plus en plus développés dans le but de fluidifier le trafic [EUR10]. Une gestion dynamique nécessite d'obtenir en temps réel différentes données sur l'état du trafic. A partir de ces données, on peut adapter les stratégies à mettre en place pour fluidifier le trafic, comme par exemple la réduction de la vitesse maximale de circulation, la régulation du nombre de véhicules entrant sur une voie rapide, ou l'allocation dynamique de voies. On peut également mettre à jour les modèles de trafic, ou encore informer le conducteur de l'imminence d'une congestion, lui permettant ainsi de changer d'itinéraire.

II.2.a Données de trafic nécessaires aux gestionnaires

Les données de trafic classiques, comme la présence ou le passage d'un véhicule, le débit (nombre de véhicules sur une portion de chaussée donnée pendant un intervalle de temps donné), le taux d'occupation (pourcentage de temps pendant lequel une portion de chaussée est occupée par des véhicules), et la vitesse moyenne ou instantanée des véhicules, sont recueillies avec des précisions satisfaisantes depuis plus de 10 ans [CER99]. Une donnée un peu plus complexe à recueillir est la classe des véhicules circulant sur la chaussée (par exemple motorcycle, véhicule léger, ou poids lourd). Elle est principalement utile en temps différé [LAW06] pour anticiper l'usure des routes, mais elle permet aussi de dissocier les débits, taux d'occupation et vitesses de chaque catégorie de véhicules, ce qui conduit à une modélisation plus réaliste et donc à une meilleure prévision du trafic.

Citons deux autres données importantes pour les gestionnaires de trafic : le temps de parcours et la matrice origine-destination. On appelle « temps de parcours » le temps nécessaire pour aller d'un point A à un point B. Connaître en temps réel les temps de parcours est utile pour informer les conducteurs, et pour mettre à jour des modèles de prédiction de temps de parcours, qui sont une des clés de la gestion de trafic [KHO11]. La matrice origine-destination (MOD) est une autre donnée essentielle pour modéliser l'écoulement du trafic à une intersection [KHO11-2] : chaque élément a_{ij} de cette matrice représente le nombre de véhicules venant de la rue i et allant vers la rue j pendant un intervalle de temps donné.

II.2.b Principe et apports de la ré-identification de véhicules

L'obtention de ces deux données clés (temps de parcours et matrice origine-destination) nécessite la ré-identification d'un même véhicule, ce qui est une tâche plus complexe que la classification de véhicules. Il s'agit de détecter la présence d'un véhicule donné en différents points fixes situés sur une route. Pour ce faire, on compare les identifiants d'un véhicule obtenus en deux points de mesure successifs (l'identifiant peut être par exemple la plaque d'immatriculation du véhicule). Il suffit donc que les signaux utilisés pour la ré-identification soient immuables à court terme. La ré-identification est en cela différente de l'identification, utilisée par exemple pour autoriser un véhicule à rentrer dans une zone à accès réglementé. En effet, au cours de l'identification, on compare l'identifiant mesuré à une base de données préétablie : il faut donc que les identifiants soient immuables à long terme.

La ré-identification d'un véhicule fonctionne de la manière suivante : lors du 1^{er} passage d'un véhicule *vh1* en un point de mesure A à l'instant t_A , un signal est enregistré, et on en extrait un identifiant propre à ce véhicule. Lors du passage de ce même véhicule au point de mesure suivant, B, à l'instant t_B , on extrait de nouveau un identifiant : si l'on arrive à apparier les identifiants calculés en A et en B, on dit alors qu'on a ré-identifié le véhicule *vh1*. On appelle « taux de ré-identification » le rapport entre le nombre de véhicules ré-identifiés et le nombre de véhicules ré-identifiables (Figure 2).

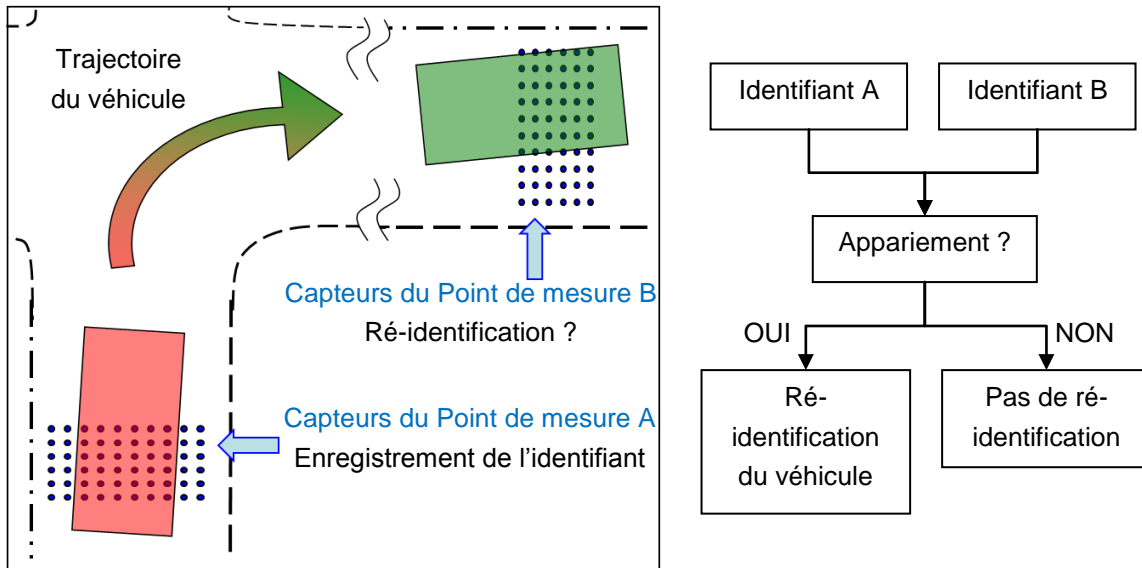


Figure 2 – Principe de la ré-identification d'un véhicule

Actuellement, le temps de parcours est surtout calculé de façon indirecte à partir de mesures globales du trafic, comme le débit, la densité, ou le taux d'occupation et la vitesse [CER08]. Pour être précises, ces méthodes nécessitent que les conditions de trafic soient stables dans l'espace et dans le temps, ce qui est concrètement rarement le cas, en particulier quand un accident survient. À l'inverse, ré-identifier un véhicule donne directement accès à un temps de parcours individuel entre les points de mesure A et B à partir des instants de passage t_A et t_B . D'après [KAV10], le taux de ré-identification minimal pour obtenir une estimation correcte de la médiane¹ de la distribution des temps de parcours dépend du débit des véhicules et du taux d'actualisation voulu. Une estimation précise de la médiane nécessite un nombre minimum N de ré-identifications, qu'ils ont déterminé comme valant $N=25$. Soit F la fréquence d'actualisation, et Deb le débit de véhicules par heure (noté vh/h) : le taux de ré-identification T vaut alors $T = N / (F \cdot Deb)$. Illustrons la valeur de T dans deux cas : un cas où la circulation est fluide, et un cas où le trafic est congestionné. Faisons l'hypothèse d'une route où le débit maximal des véhicules est de 2500 vh/h , et où le trafic baisse à 250 vh/h aux heures de pointe. Si l'on souhaite actualiser l'estimation de temps de parcours toutes les 6 minutes (ce qui définit la fréquence F), alors le taux de ré-identification devra être de 10% en cas de circulation fluide, et de 100% en cas de trafic congestionné. De son côté, [CER08] assure qu'avoir un taux de ré-identification de 50% est suffisant pour bien estimer la distribution des temps de parcours sur un trajet donné.

Comme pour le temps de parcours, la MOD peut être estimée de façon indirecte à l'aide des débits en entrée et sortie de l'intersection [CER99], alors que la ré-identification de véhicules permet de

¹ La médiane d'un ensemble de valeurs est le nombre tel que la moitié des valeurs lui soit inférieure et l'autre moitié des valeurs lui soit supérieure.

l'obtenir directement. Cependant, il est ici important de ré-identifier un maximum de véhicules : si les mesures des flux ne sont que partielles (comme dans le cas d'un comptage manuel effectué par des enquêteurs placés au bord de la route), elles nécessiteront un traitement statistique car elles ne représenteront qu'un échantillon de l'ensemble des trajets effectués par les véhicules à cette intersection [CER04].

II.2.c Conclusion

Un grand nombre de besoins des gestionnaires de trafic sont déjà bien remplis par les technologies actuelles. Il reste toutefois une forte marge d'amélioration dans l'estimation des temps de parcours et des matrices origine-destination obtenus grâce à la ré-identification des véhicules, à condition que celle-ci se fasse sur un pourcentage suffisant de véhicules en circulation. Il est donc important de disposer d'une méthode fiable de ré-identification.

II.3 Technologies actuellement utilisées pour ré-identifier des véhicules

Plusieurs technologies permettent de ré-identifier des véhicules. Dans cette partie, nous nous intéressons aux technologies autres que les capteurs magnétiques, qui seront traités en II.4. On distingue les méthodes qui nécessitent d'équiper les véhicules qui sont ré-identifiés et celles qui ré-identifient potentiellement tous les véhicules.

II.3.a Ré-identification avec équipement préalable des véhicules

Avec ces technologies (Figure 3), seuls les véhicules équipés sont ré-identifiables : ils sont alors appelés « véhicules sondes ».

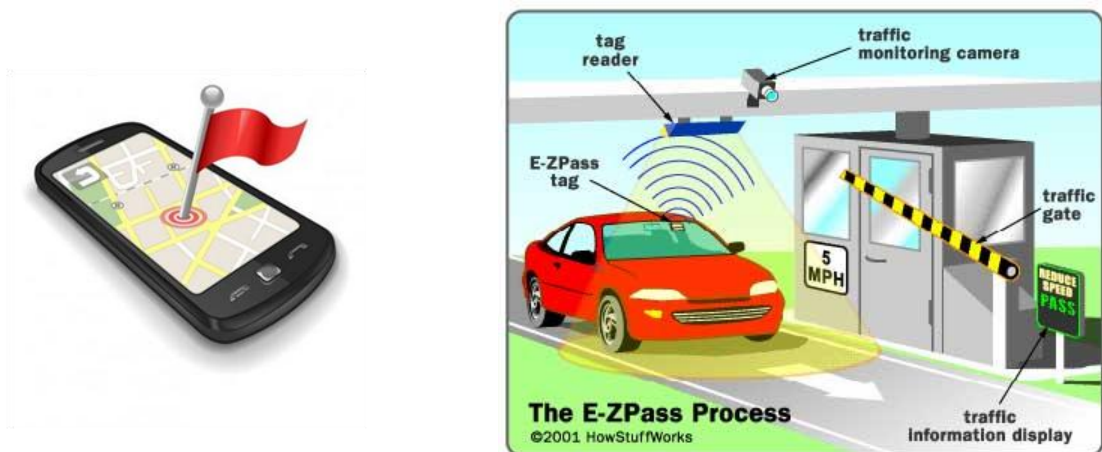


Figure 3 – Illustration de technologies nécessitant un équipement préalable des véhicules : téléphone portable équipé d'un GPS (à gauche), et principe de péage avec badge équipé d'une puce RFID (à droite)

II.3.a.1 Ré-identification par suivi de la position du véhicule

Plusieurs moyens permettent de suivre la position des véhicules à l'aide de systèmes embarqués : les téléphones portables, les téléphones portables équipés d'une puce GPS, et les GPS directement intégrés aux véhicules. Les frais d'équipement sont laissés à la charge du conducteur : c'est donc une solution peu chère pour les gestionnaires de trafic mais elle nécessite d'impliquer et de convaincre le conducteur de l'intérêt du système.

Les téléphones portables sans GPS peuvent être localisés à l'aide du réseau de téléphonie mobile (par triangulation à partir des antennes réseaux par exemple), mais la précision du positionnement est généralement de 300m [LED08, MOH11], ce qui est trop faible pour ré-identifier un véhicule, car cela nécessite de savoir qu'il se trouve en un point précis à un moment donné. Avec une précision de 300m, la présence du véhicule pourrait être détectée sur une route autre que celle sur laquelle il roule, faussant ainsi le calcul de temps de parcours. De plus, comme ce mode de géo-localisation fait obligatoirement appel aux réseaux de téléphonie mobile, il ne permet pas de prendre en compte les téléphones étrangers (à moins que des accords ne soient passés avec des opérateurs téléphoniques étrangers).

La précision du positionnement GPS est de l'ordre de quelques mètres [MER10], mais elle est toutefois très sensible à l'environnement artificiel comme naturel : [SCH12] indique par exemple les problèmes rencontrés en environnement urbain (présence de tunnels, d'immeubles, de métal, d'autres véhicules, et de sources radio) et [SCH12-2] ceux rencontrés en environnement alpin (présence de tunnels, de montagnes, et de murs anti-bruits). Pour compenser cette sensibilité et être capables de localiser un véhicule sur une voie donnée, [SCH12] et [SCH12-2] fusionnent les données GPS avec celles de capteurs supplémentaires embarqués dans les véhicules (gyroscopes, accéléromètres, altimètres, ...). Le GPS ne semble donc pas pouvoir être utilisé seul dans certains environnements.

L'utilisation des GPS directement intégrés aux véhicules pour faire de la gestion de trafic est freinée par le nombre encore faible de véhicules qui en sont équipés. De plus, ce pourcentage de véhicules équipés ne devrait pas augmenter car aujourd'hui les ventes de GPS stagnent au profit des ventes de téléphones portables munis de GPS. L'utilisation des téléphones portables avec GPS est quant à elle de plus en plus expérimentée en gestion de trafic [HER09], et les partenariats entre opérateurs téléphoniques et diffuseurs d'information trafic se multiplient. Malgré un problème d'anonymat des données et de respect des obligations de la CNIL qu'il faut absolument garantir pour rassurer les utilisateurs [LED08, BEL08], et une précision de localisation qui dépend de l'environnement, cette façon de recueillir des informations sur le trafic en temps réel paraît prometteuse. Notons cependant que bien qu'il y ait actuellement 72 millions d'abonnements mobiles en France, soit plus d'un abonnement par habitant (Source ARCEP septembre 2012), on ne peut garantir que tous les véhicules soient équipés d'un téléphone portable, et encore moins d'un téléphone portable avec GPS. L'estimation de matrices origine-destination est donc délicate avec ce mode de recueil de données.

II.3.a.2 Ré-identification par identification du véhicule en des points fixes

Il est aussi possible de ré-identifier les véhicules équipés d'un badge avec puce RFID (radio-identification), badge utilisé par exemple pour s'acquitter des frais d'autoroute (système Télépéage en France) : le véhicule sera alors ré-identifié à chaque point fixe muni d'un lecteur de badge [KAT08, YUM11]. D'après [YUM11], moins de 0.001% des véhicules ne sont pas détectés par le système, ce qui nous donne un taux de ré-identification de pratiquement 100% des véhicules équipés. En France, il y avait 4.3 millions d'abonnés au télépéage fin 2011 (Source : ASFA, Association des Sociétés Françaises d'Autoroute) pour 38 millions de véhicules en circulation, ce qui signifie qu'un peu moins de 9% des véhicules français étaient alors équipés. On notera de plus que l'harmonisation des péages européens n'est pas encore finalisée : les véhicules étrangers ne pourront donc être ré-identifiés.

Là aussi, les frais d'équipement en badge sont laissés à la charge du conducteur, mais le gestionnaire de la route doit de son côté installer des lecteurs de badge couvrant toutes les voies de circulation (donc montés sur des portiques surplombant les voies) et capables de fonctionner avec des badges en mouvement (jusqu'à 130km/h sur les autoroutes françaises). Or d'après [RIT10], un lecteur de badges de péage coûte 2000 à 4000 \$ (1550-3100€) de frais d'installation par voie, dure 10 ans, et ses frais de maintenance annuels sont évalués à 10% de son coût d'installation (évaluation de 2001). De plus, l'utilisation de badges RFID pose le même problème d'anonymat des données que les téléphones portables.

De façon similaire, les adresses MAC d'équipements Bluetooth présents dans un véhicule (téléphones portables, GPS, casque audio, ...) peuvent être utilisées pour le ré-identifier, mais de façon anonyme, en des points fixes à l'aide de capteurs placés au bord de la route [ARA12, RES11]. Les temps de parcours estimés sont alors comparables à ceux obtenus avec des badges RFID [ARA12]. Toutefois, un système de comptage de véhicules peut être trompé par la présence de plusieurs appareils Bluetooth dans un même véhicule – cas qui ne devrait a priori pas apparaître avec les badges RFID. De plus, les capteurs Bluetooth ont une faible fréquence d'échantillonnage, et [RES11] montre que le taux de détection dépend de la vitesse de passage des véhicules : à 30 mph (48 km/h), 93% des appareils Bluetooth sont détectés, mais à 45 mph (72 km/h), ce taux baisse à 87%. Enfin, d'après [RES11], seuls 5% des véhicules en circulation sont équipés.

II.3.b Ré-identification potentielle de tous les véhicules

D'autres technologies permettent de ré-identifier tous les véhicules en des points fixes, sans être obligés de les équiper au préalable (Figure 4), évitant ainsi un échantillonnage biaisé des véhicules (les véhicules équipés pourraient être non représentatifs de l'ensemble des véhicules).



Figure 4 – Illustration des technologies ré-identifiant potentiellement tous les véhicules : caméra à lecture de plaques d'immatriculation (à gauche), et boucles inductives (à droite)

II.3.b.1 Capteurs non-intrusifs (hors chaussée)

La technologie la plus répandue pour ré-identifier des véhicules est l'utilisation de caméras à lecture automatique de plaque d'immatriculation (CLAP ou caméras à LAPI). Plusieurs étapes sont nécessaires pour pouvoir reconnaître la plaque : il faut d'abord la détecter dans l'image filmée, puis séparer les caractères qui composent le numéro de la plaque, avant de pouvoir les reconnaître [HSU11]. Chacune de ces étapes est susceptible de conduire à une diminution du taux de ré-identification, qui atteint toutefois de 74% à 99% [ANA06]. Ce taux est légèrement sensible aux

conditions météorologiques : d'après [CER08], il baisse de 5% par temps de pluie et la nuit. On notera de plus que les véhicules aux plaques étrangères ne seront pas forcément ré-identifiables.

Outre un nouveau problème d'anonymat des données, les CLAP sont surtout très chères : d'après [CHE07] et [RIT10], chaque caméra coûte entre 3500 et 5500\$ (2700-4200€), prix auquel s'ajoutent les frais d'installation de 1000\$ (770€) et des frais de maintenance estimés entre 200 et 1000\$ (150-770€) par an.

II.3.b.2 Capteurs intrusifs (dans la chaussée)

Une dernière technologie permet de ré-identifier des véhicules : les boucles inductives (ou boucles électromagnétiques) [CER07]. Ces capteurs sont les plus couramment utilisés depuis plus de trente ans pour mesurer des données de trafic (débit, taux d'occupation, vitesse, ...), et ils sont déjà largement déployés sur les routes françaises (plusieurs dizaines de milliers) et européennes. Ils sont composés d'une bobine de fil conducteur intégrée dans la chaussée : cette bobine est excitée par un signal oscillant à une fréquence donnée, et elle génère ainsi un champ magnétique à proximité. Lorsqu'un objet métallique, dans notre cas un véhicule, passe au-dessus de la boucle, le champ magnétique généré est perturbé, et le véhicule est alors détecté.

Les taux de ré-identification obtenus avec les boucles inductives varient de 30 à 68% [ERN10, NDO09, COI07, CER07]. Cette ré-identification est anonyme et se base sur la longueur des véhicules, ou sur leur signature électromagnétique, c'est-à-dire la perturbation électromagnétique qui est mesurée par la boucle lorsque le véhicule passe au-dessus d'elle : ce signal est en théorie propre au véhicule (Chap.III), car il dépend des propriétés ferromagnétiques de son châssis [CER07]. La signature électromagnétique sert d'identifiant au véhicule d'un point de mesure à l'autre.

Toutefois, l'installation des boucles inductives reste chère (même si elle est plus abordable que celle des CLAP) : de 500 à 800\$ (380-610€) par boucle [VDC07]. En effet, elle nécessite de faire plusieurs saignées dans la chaussée et de bloquer la circulation pendant plus d'une heure par voie. De plus, les boucles peuvent être abîmées par le passage de véhicules lourds, et doivent être renouvelées à chaque réfection de la chaussée (sans possibilité de les récupérer), soit tous les 10 ans au minimum, ce qui contribue à entraîner des coûts de maintenance de 300 à 500\$ par an (230-380€) d'après [RIT10].

II.3.c Conclusion

La majorité des méthodes actuelles de ré-identification pose des problèmes d'anonymat des données, nécessite d'équiper le véhicule au préalable, et/ou coûte cher à l'unité ou en génie civil lors de l'installation. Le Tableau 1 page suivante résume les principaux avantages et inconvénients des technologies autres que les capteurs magnétiques permettant de ré-identifier les véhicules. Nous allons voir par la suite que l'utilisation de capteurs magnétiques peut offrir une alternative économique respectant l'anonymat des conducteurs et fonctionnant sur tous les véhicules.

	Technologie	Données anonymes	Taux de ré-identification		Coût installation	Frais annuels maintenance
			%	Précision localisation		
Suivi du véhicule	Téléphone portable	Non	100% des véhicules équipés (très grand nombre)	~300m	/	/
	Tél. portable + GPS	Non	100% des véhicules équipés (nombre croissant)	quelques m	/	/
	GPS	Non	100% des véhicules équipés (peu nombreux)	quelques m	/	/
Ré-identification en points fixes	Badge RFID	Non	~100% des véhicules équipés (9% en France)	< 1m	1550-3100€	155-310€
	Bluetooth	Oui	< 100% des véhicules équipés (5%, nombre croissant), dépend de la vitesse		?	?
	Caméras CLAP	Non	74-99%		3470-4970€	150-770€
	Boucles inductives	Oui	30-68%		380-610€	230-380€

Tableau 1 – Principales caractéristiques des technologies permettant de ré-identifier des véhicules

II.4 Ré-identifier avec des capteurs magnétiques

II.4.a Avantages des capteurs magnétiques

Comme les boucles inductives, les capteurs magnétiques mesurent par tous les temps un signal propre au véhicule lorsque celui-ci passe au-dessus d'eux (voir Chap.III), et permettent de détecter les véhicules [MAR78], de mesurer leur vitesse et de déterminer leur classe [LAO96, CAR99, RIP99], et de les ré-identifier [CHE07, KWO09]. Toutefois, la Figure 5 permet d'illustrer que les signaux magnétiques sont beaucoup plus riches que ceux mesurés par les boucles inductives : elle représente en effet deux signatures de véhicules légers, l'une mesurée par une boucle inductive (à gauche) et l'autre par un capteur magnétique tri-axe (à droite). La signature inductive n'a que peu de détails, alors que la signature magnétique possède beaucoup d'oscillations.

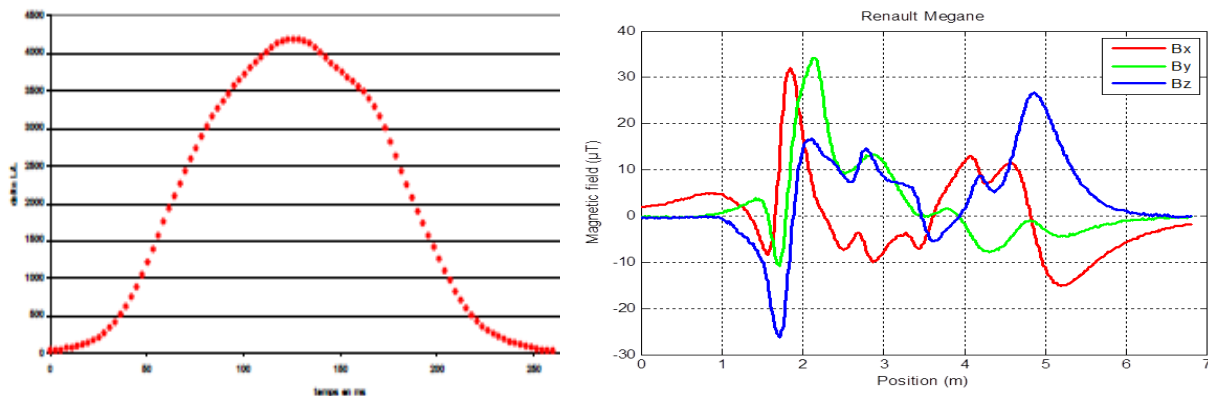


Figure 5 – Signatures de deux véhicules légers : boucles inductives (à gauche) [CER07] VS capteurs magnétiques (à droite)

Générée par l'aimantation du véhicule (voir Chap.III), la signature magnétique varie à long terme : ainsi, elle permet de faire de la ré-identification sur quelques kilomètres tout en respectant la vie privée des conducteurs. En effet, même si une base de données de signatures magnétiques de véhicules était établie (comme pour les plaques d'immatriculation), il faudrait la réactualiser très régulièrement à cause des variations des signaux à long terme. Une partie de l'aimantation, dite induite, risque toutefois de faire varier la signature du véhicule en fonction de son orientation dans le champ magnétique terrestre. On s'attachera au cours de cette étude à évaluer ce risque.

Enfin, des gains économiques importants sont possibles avec l'utilisation de ces capteurs (Figure 6) : en effet, leur coût unitaire est inférieur à un euro pour les modèles les moins chers (tandis que les modèles de très haute résolution de la marque Bartington, surdimensionnés pour une application de ré-identification de véhicules, coûtent 1000 €) et leur installation dans la chaussée ne nécessite qu'un carottage lorsqu'ils sont associés à un système sans fil, ce qui limite le temps d'installation à 10 minutes par capteur [VDC07].

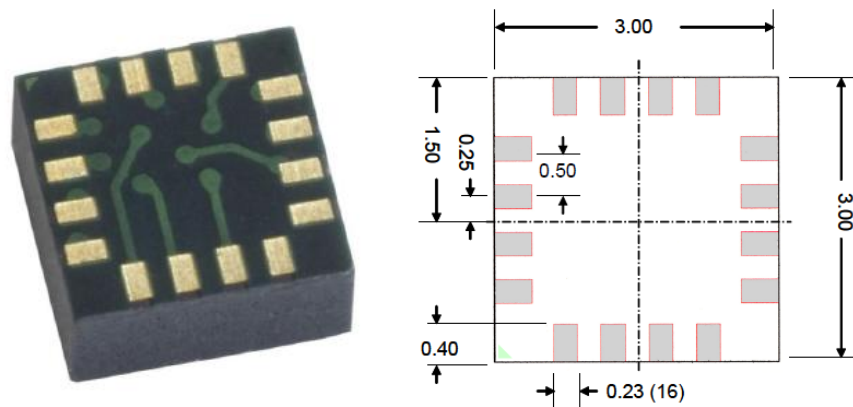


Figure 6 – Capteur magnétique tri-axe HMC1043 de la marque Honeywell (dimensions en mm)

II.4.b Systèmes magnétiques existants

Plusieurs entreprises vendent des capteurs capables de détecter la présence ou le passage de véhicules, de mesurer leurs vitesses, ou de donner leur classe (capteur « NC100/200 » de la société Vaisala [VAI], ex-capteur « Groundhog » de la société Nu-metrics [NUM], capteur « Esquirol » de la société Sterela [STE], capteur « Hi Star NC 200 » de la société Magsys [MAG], ...). Fondée en 2003, la société Sensys Networks a été en 2007 la première à vendre des capteurs magnétiques tri-axes sans fil permettant de ré-identifier des véhicules et d'en extraire une distribution des temps de parcours (médiane, 80^{ème} centile², et 90^{ème} centile). Leur système commercialisé est très abouti, avec des temps de parcours et des niveaux de trafic correspondants affichés en temps réel toutes les minutes et intégrés aux cartes Google Maps.

Leurs capteurs s'installent facilement dans la chaussée à l'aide d'un carottage de 10cm de diamètre et 6.5cm de profondeur. Ils ont été conçus pour supporter des températures comprises entre -40°C et 85°C [SEN08], et pour pouvoir être extraits de la chaussée si besoin [SEN12]. Ils utilisent une

² Les 99 centiles d'un ensemble de valeurs croissantes sont les 99 nombres qui divisent ces valeurs en 100 parts de même taille. Par exemple, le 80^{ème} centile est tel que 80% de l'ensemble des données lui sont inférieures.

technologie sans fil et les données sont centralisées à l'aide de répéteurs situés au bord de la route (Figure 7).

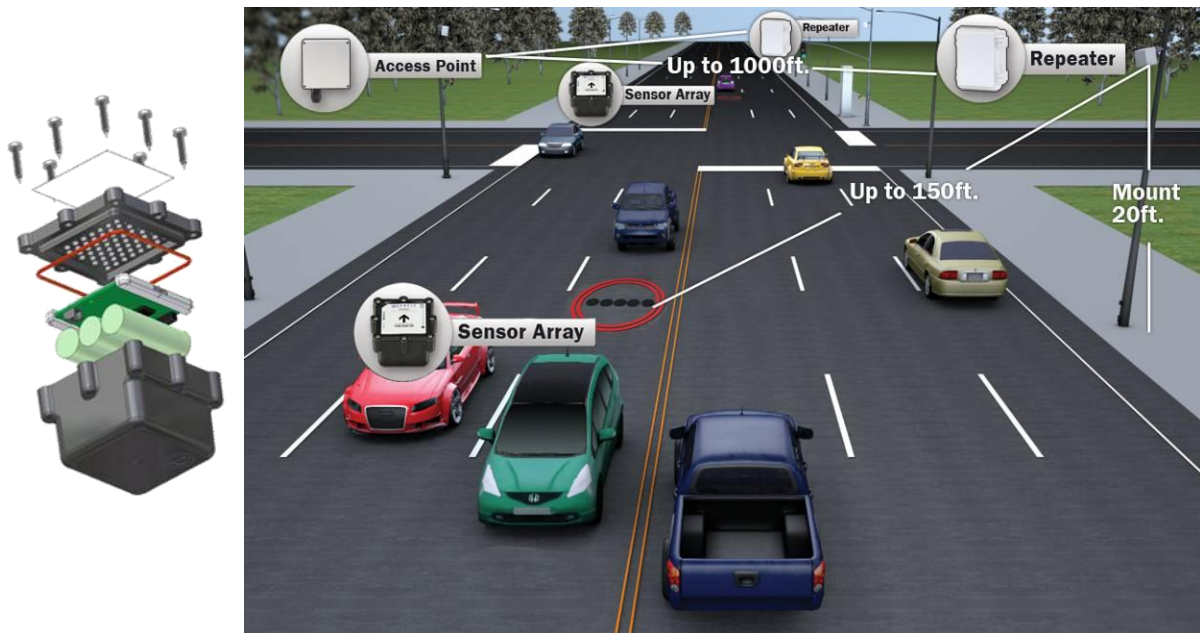


Figure 7 – Capteur magnétique Sensys Networks (vue en éclaté) & sa configuration (ligne de 5 capteurs) pour faire de la ré-identification sur un grand axe de circulation (Source <http://www.sensysnetworks.com>)

Pour éviter de décharger trop vite la batterie des capteurs (supposée durer 10 ans), Sensys Networks a cherché à optimiser trois caractéristiques : la consommation des cartes électroniques des capteurs, le protocole de communication utilisé, et la quantité de données transmise par les capteurs.

Les cartes électroniques sont composées d'un capteur magnétique, d'un microcontrôleur, d'un émetteur-récepteur radio, d'une antenne, et d'une mémoire [SEN08-2]. La plus grosse consommation de courant a lieu lors de l'échantillonnage du champ magnétique par le capteur magnétique, et lors de la transmission des données par l'émetteur-récepteur [ARR07]. Ainsi, Sensys Networks a choisi de limiter la fréquence d'échantillonnage du capteur magnétique à 128Hz, fréquence qu'ils ont choisie comme le meilleur compromis entre la quantité d'information nécessaire pour ré-identifier un véhicule et la consommation de la carte. De plus, un microcontrôleur ultra-basse consommation a été sélectionné. Ensuite, Sensys a conçu son propre protocole de communication pour réduire la consommation due à la transmission de données, tout en conservant une faible latence [SEN08, SEN08-2]. Enfin, ils ont limité la quantité de données qui sont transmises par les capteurs sur leur réseau sans fil, en ne gardant que les extrema des signatures magnétiques des véhicules pour faire de la ré-identification (Figure 8).

Dans son offre commerciale, Sensys Networks annonce des taux de ré-identification de 50 à 70% sur trafic réel, avec une ligne de 5 capteurs placée perpendiculairement au passage des véhicules (Figure 7), et sans changement d'orientation des véhicules entre deux points de mesure successifs (les véhicules roulent en ligne droite). Dans [SAN11], ils ont réussi à apparier 64% des véhicules entre les deux points de mesure successifs, avec toutefois 7% de fausses ré-identifications. Les 36% de véhicules restants n'ont pas été reconnus sur les deux points de mesure à la fois. Ces résultats ont été obtenus avec une ligne de 7 capteurs, toujours placée perpendiculairement au passage des véhicules, mais cette fois-ci dans une bretelle d'accès donc avec un changement d'orientation du

véhicule (les véhicules ont tourné entre les deux points de mesure). D'après l'étude indépendante [REM11], les taux seraient plutôt de 38 à 48% avec 2 à 6% d'erreurs en ligne droite, mais ces 2 à 6 % d'erreurs de ré-identification n'entraînent que 0.03 à 1.3% d'erreur d'estimation des 25^{ème}, 50^{ème} et 75^{ème} centiles de la distribution des temps de parcours.

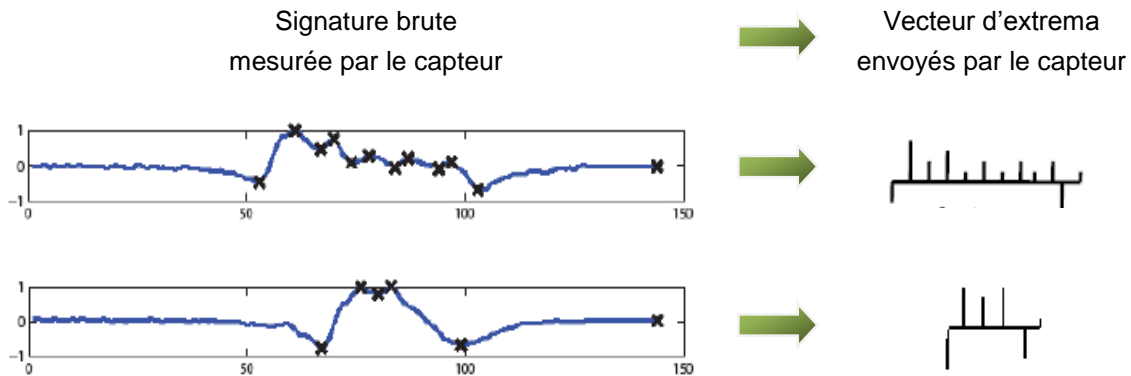


Figure 8 – Deux exemples de signature brute mesurée par un capteur Sensys Networks, puis sa version compressée avant transmission sur le réseau : on ne garde que ses extrema (Source P. Varaiya, Sensys Networks)

II.5 Positionnement de notre étude

Au cours de cette thèse ayant pour sujet la ré-identification de véhicules à partir de matrices de capteurs magnétiques tri-axes, nous avons cherché à déterminer quelles performances maximales pouvaient être atteintes pour un nombre de capteurs donné, et donc pour un coût donné. Pour ce faire, nous avons évalué des méthodes de ré-identification utilisant souvent l'ensemble du signal mesuré par différentes configurations spatiales de capteurs, et pas uniquement ses extrema (voir Chap.V et Chap.VI), et nous avons comparé les performances obtenues à celles de Sensys Networks. L'orientation du véhicule par rapport au Nord pouvant modifier l'allure de la signature magnétique, nous avons étudié l'incidence sur les performances de ré-identification d'un changement d'orientation du véhicule. Enfin, la signature magnétique pouvant varier en fonction de la position du véhicule par rapport au capteur, nous avons étudié l'incidence sur les performances d'un décalage latéral du véhicule sur la chaussée et proposé des méthodes capables de s'en affranchir.

III. Signatures magnétiques et ré-identification

Dans ce chapitre, nous allons chercher à comprendre d'où viennent les signaux que les capteurs magnétiques mesurent lorsque les véhicules passent au-dessus d'eux, et étudier quels facteurs sont susceptibles de les influencer.

III.1 Introduction au magnétisme

III.1.a Définitions

Commençons par définir quelques grandeurs utilisées en magnétisme, en nous appuyant sur l'exemple de l'aimant. L'aimant est en effet l'objet le plus connu générant par lui-même un champ d'induction magnétique B , exprimé en Tesla (T). Ce champ B généré par l'aimant peut être mis en évidence en plaçant une boussole ou de la limaille de fer à son voisinage (Figure 9).

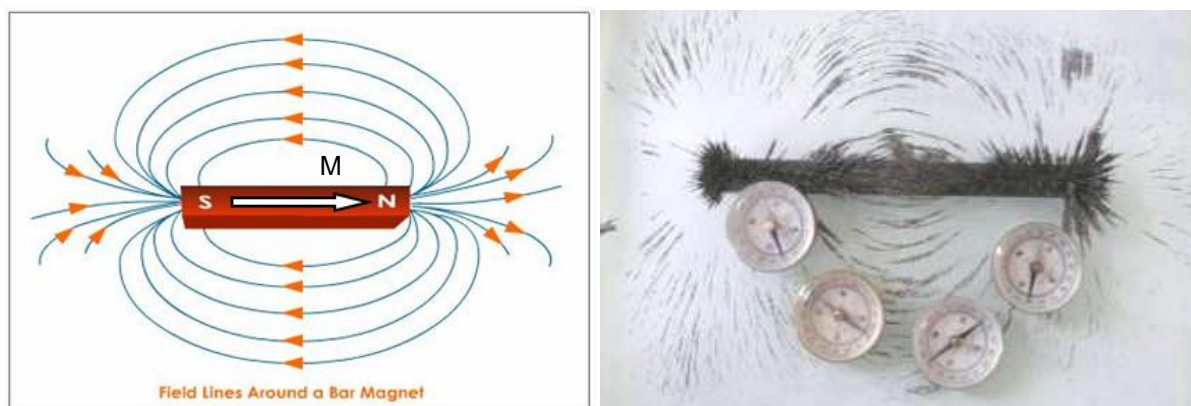


Figure 9 – Champ d'induction magnétique B généré par un aimant d'aimantation macroscopique M : à gauche, représentation des lignes de champ en bleu ; à droite, mise en évidence des lignes de champ à l'aide de limaille de fer et de quatre boussoles (Photo Académie de Nice)

L'aimant est constitué d'un matériau dit « ferromagnétique dur », qui possède une aimantation macroscopique M , orientée dans une direction particulière (Figure 9). L'aimantation s'exprime en Ampère par mètre (A/m). Pour l'acquérir, il a fallu tout d'abord appliquer au futur aimant un champ d'excitation magnétique H , exprimé en A/m.

Dans le vide, en dehors de la matière aimantée, B est simplement relié à H par une constante, μ_0 , appelée perméabilité du vide :

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} \text{ avec } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{A}^{-2} \cdot \text{s}^{-2} \quad (1)$$

A l'intérieur de la matière aimantée, le champ d'induction magnétique B dépend à la fois du champ d'excitation H et de l'aimantation M de la matière :

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2)$$

Dans l'aimant, chaque petit volume de matière possède sa propre aimantation M à l'échelle microscopique. L'aimantation est liée au moment magnétique m , exprimé en $A.m^2$, par la formule suivante :

$$\vec{M} = \frac{d\vec{m}}{dvol} \text{ avec } vol \text{ le volume} \quad (3)$$

L'aimantation M est donc la densité de moments magnétiques m pour un volume donné.

Quelles sont les caractéristiques du champ d'induction magnétique B généré par un objet aimanté ? Chaque volume microscopique de matière aimantée peut être en fait considéré comme un aimant, ou « dipôle magnétique ». D'après le modèle ampérien du dipôle magnétique, un dipôle est équivalent à un circuit électrique fermé circulaire C , ou spire, de section S , de rayon r' , de déplacement infinitésimal $d\vec{l}$ le long de C , parcouru par un courant continu d'intensité I (Figure 10).

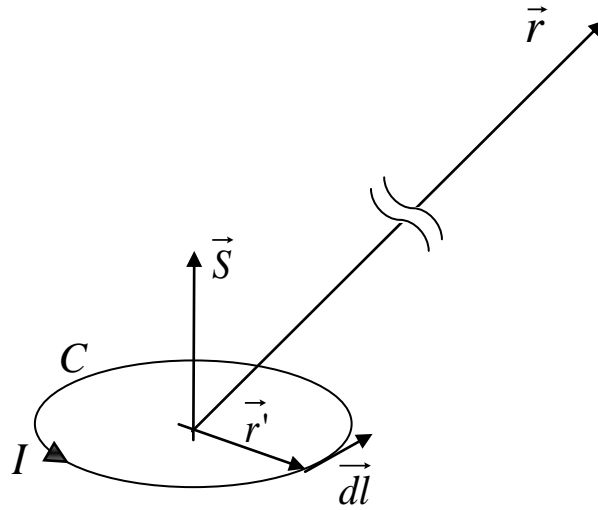


Figure 10 – Spire circulaire de section S , de rayon r' , parcourue par un courant continu d'intensité I et observée à une distance r

En magnétostatique, la loi de Biot et Savart, qui découle de la loi de Maxwell-Ampère, permet de relier le champ d'induction magnétique B aux courants électriques. Dans le cas particulier d'un circuit électrique fermé, B mesuré à une distance r vaut :

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_C \frac{I d\vec{l} \wedge (\vec{r} - \vec{r}')}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|^3} \quad (4)$$

Avec ce modèle, à une distance r grande par rapport à r' , on obtient une nouvelle définition du moment magnétique pour toute surface S s'appuyant sur le circuit C :

$$\vec{m} = I \iint_S d\vec{S} = I \cdot \vec{S} \quad (5)$$

Et le champ d'induction magnétique généré par ce moment magnétique s'exprime de la façon suivante :

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{3(\vec{m} \cdot \vec{r})\vec{r}}{\|\vec{r}\|^5} - \frac{\vec{m}}{\|\vec{r}\|^3} \right) \quad (6)$$

A grande distance, B dépend donc de la façon dont l'aimantation est distribuée dans l'objet, et de la position du capteur par rapport à l'objet générateur du champ. Dans la suite de cette étude, nous simplifierons de plus l'appellation de B en « champ magnétique ».

III.1.b Matériaux magnétiques

En magnétisme, on distingue trois types de matériaux en fonction de leur réaction à un champ d'excitation H : les matériaux diamagnétiques, qui s'aimantent faiblement dans un sens opposé à l'excitation, les matériaux paramagnétiques, qui s'aimantent faiblement dans le même sens que l'excitation, et les matériaux ferromagnétiques, qui s'aimantent fortement dans le même sens que l'excitation. Ce sont ces derniers matériaux qui nous intéressent particulièrement pour l'étude des signatures magnétiques de véhicules.

Les matériaux ferromagnétiques sont eux-mêmes divisés en deux familles : les durs (par exemple les aimants) et les doux (par exemple des alliages de fer). Les matériaux ferromagnétiques durs sont conçus pour conserver leur aimantation propre, tandis que les matériaux ferromagnétiques doux ont une aimantation qui s'aligne presque instantanément sur le champ externe. Ces deux familles sont caractérisées par la courbe d'aimantation macroscopique représentée Figure 11, qui est un cycle d'hystérésis.

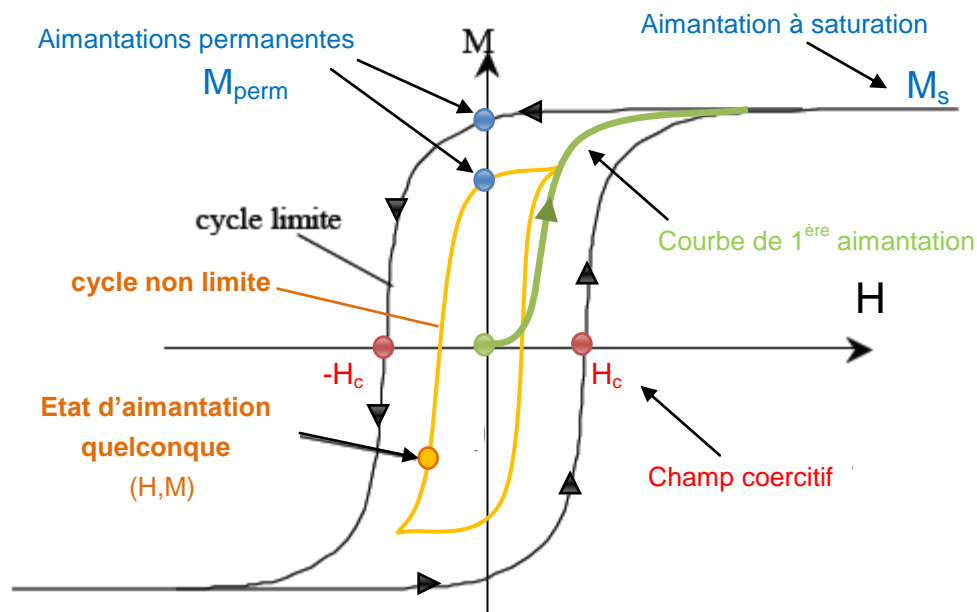


Figure 11 – Cycles d'hystérésis : Aimantation M d'un matériau ferromagnétique en fonction du champ d'excitation magnétique H appliqué au matériau [BRI97, CHA01, VUI08]

Si l'on part d'un matériau encore non aimanté ($M = 0$), et qu'on lui applique un champ d'excitation H croissant, son aimantation suit alors la courbe de 1^{ère} aimantation, jusqu'à atteindre un maximum qui dépend de H, et qui est l'origine d'un cycle d'hystérésis réduit, appelé « cycle non limite ». Si H est

suffisamment fort, cette aimantation maximum peut atteindre M_s , l'aimantation à saturation, et elle suivra alors son « cycle limite ». Une fois que le matériau est aimanté, son aimantation se trouvera toujours dans un état quelconque (H, M) situé quelque part à l'intérieur du cycle limite.

L'aimantation ne revient pas à zéro par annulation du champ H, puisque le matériau conserve une aimantation permanente³ M_{perm} non nulle. Si l'on applique un champ en sens inverse de l'aimantation ($H < 0$), elle finit par s'inverser et s'aligner sur H. Si le matériau a déjà atteint M_s , il faudra que la valeur absolue de H dépasse la valeur du champ coercitif H_c pour réussir à annuler puis à inverser le sens de l'aimantation.

Une fois aimanté, le matériau devient un générateur de champ magnétique.

III.1.c Aimantation à plus petite échelle

Comment se traduit cette aimantation macroscopique à plus petite échelle ? A l'échelle atomique, l'aimantation provient des électrons qui tournent autour du noyau de l'atome, et de la propre rotation des électrons sur eux-mêmes. A l'échelle mésoscopique, les matériaux ferromagnétiques se divisent en domaines élémentaires, appelés domaines de Weiss, qui possèdent une aimantation constante. Ces domaines sont séparés par des parois de Bloch, où l'aimantation change de direction. La Figure 12 reprend la courbe de 1^{ère} aimantation, mais à une échelle mésoscopique.

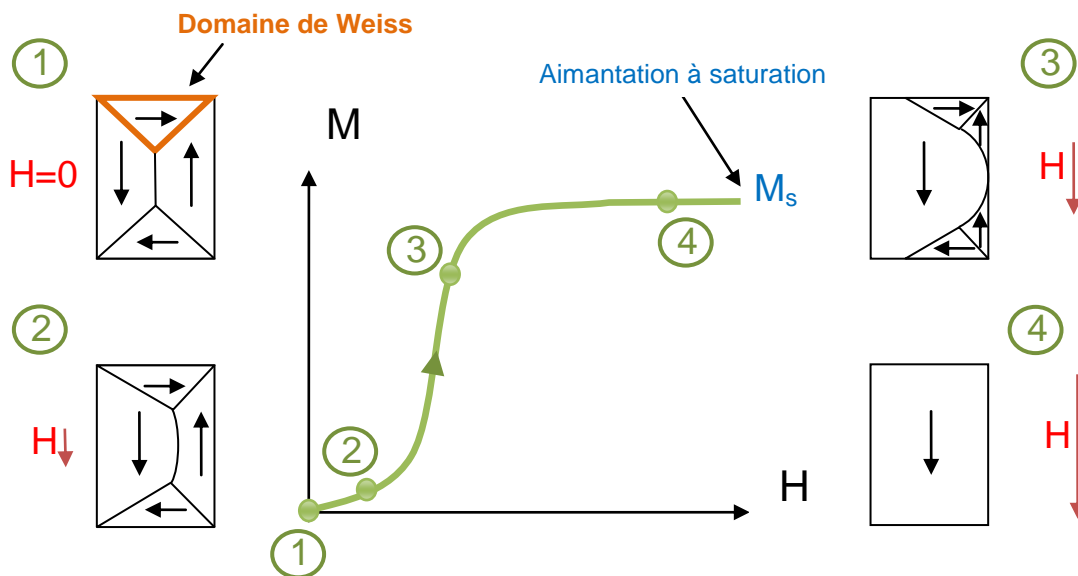


Figure 12 – Courbe de 1^{ère} aimantation d'un matériau ferromagnétique à l'échelle macroscopique et mésoscopique [BRI97, CHA01, VUI08]

Lorsque le matériau n'est pas aimanté (point 1 de la Figure 12), les aimantations des domaines de Weiss ne sont pas ordonnées et elles se compensent à l'échelle macroscopique ($M=0$). Si l'on

³ Les termes d'aimantations permanente M_{perm} et rémanente M_r sont souvent assimilés. Rigoureusement, M_{perm} est l'aimantation qui reste quand le champ d'excitation externe H_{ext} est nul, et M_r quand le champ interne H_{int} est nul. H_{ext} et H_{int} sont liés par le champ démagnétisant H_d , généré par l'aimantation du matériau, et qui tend à le désaimanter. Comme H_{int} ne peut être facilement annulé, nous préférons parler de M_{perm} plutôt que M_r dans cette étude, et H correspond donc à H_{ext} .

applique ensuite un faible champ H au matériau (point 2), les parois de Bloch se déplacent de façon réversible à l'échelle macroscopique, pour commencer à aligner les domaines de Weiss sur H . Si l'on augmente encore H (point 3), les parois finissent par se déplacer de façon irréversible. Enfin, si H est suffisamment grand (point 4), on atteint une saturation magnétique du matériau : tous les domaines de Weiss sont à présent alignés sur le champ magnétique excitateur et l'aimantation est alors maximale.

Pour désaimanter un matériau ferromagnétique préalablement aimanté, il faut le chauffer au-delà de sa température de Curie, qui varie en fonction de la nature du matériau : sous l'effet de la chaleur, les aimantations élémentaires du matériau vont alors se désordonner de nouveau, les parois de Bloch vont réapparaître mais pas forcément aux mêmes endroits, leurs contributions vont se compenser, et l'aimantation macroscopique du matériau va redevenir nulle.

Sur cette courbe de 1^{ère} aimantation, pour des champs faibles (de l'ordre d'un dixième du champ coercitif : $H_c/10$) représentés sur la Figure 12 entre les points 1 et 2, une des lois de Rayleigh indique que M varie avec H selon l'équation d'une parabole :

$$M = \chi \cdot H + v \cdot H^2 \quad (7)$$

χ est la susceptibilité initiale du matériau (sans unité), et v est appelée constante de Rayleigh.

Ainsi, si l'on part d'une aimantation donnée (H_0 , M_0), et que l'on fait varier H , la nouvelle aimantation va respecter la loi de Rayleigh suivante [BRI97] :

$$M = M_0 + \chi \cdot (H - H_0) + \varepsilon \cdot \frac{v}{2} \cdot (H - H_0)^2 \quad (8)$$

Avec :

- ε valant +1 si l'on part d'une aimantation M_0 obtenue par valeurs décroissantes de H , et pour un nouveau $H > H_0$,
- et ε valant -1 si l'on part d'une aimantation M_0 obtenue par valeurs croissantes de H , et pour un nouveau $H < H_0$,

Si la variation de H est assez faible pour négliger le terme quadratique $(H - H_0)^2$ par rapport à $(H - H_0)$, il y a linéarité entre l'aimantation et le champ d'excitation H :

$$M \approx M_0 + \chi \cdot (H - H_0) = (M_0 - \chi \cdot H_0) + \chi \cdot H \quad (9)$$

L'aimantation $(M_0 - \chi \cdot H_0)$ correspond à une aimantation permanente locale.

III.1.d Aimantation permanente et aimantation induite

Dans le cas des matériaux ferromagnétiques durs, le champ coercitif H_c est très grand (de l'ordre de 10^5 - 10^6 A/m, ce qui correspond à un champ d'induction magnétique B de 0.1 à 1 T), tandis que dans le cas des matériaux ferromagnétiques doux, H_c est faible (de l'ordre de 1 à 100 A/m, ce qui correspond à un champ d'induction magnétique B de 1 à 100 μ T). Pour changer l'aimantation d'un objet fait dans un matériau doux, il suffit alors de l'orienter différemment par rapport au Nord magnétique de la Terre, car le champ magnétique terrestre est d'environ 46 μ T. A l'inverse, un objet

fait dans un matériau dur ne sera tout au plus que faiblement perturbé par le champ magnétique terrestre.

On distingue par la suite deux types d'aimantation : l'aimantation induite M_{ind} , qui dépend du champ H appliqué à l'objet, et l'aimantation permanente M_{perm} , qui est l'aimantation qui reste quand H est nul.

M_{ind} va donc dépendre de la position actuelle de l'objet par rapport au champ magnétique externe. A l'inverse, M_{perm} dépend de la façon dont le matériau a acquis son aimantation et de ses précédents états magnétiques : elle dépend donc de l'histoire de l'objet. L'aimantation totale d'un objet est la somme de M_{ind} et M_{perm} (Figure 13).

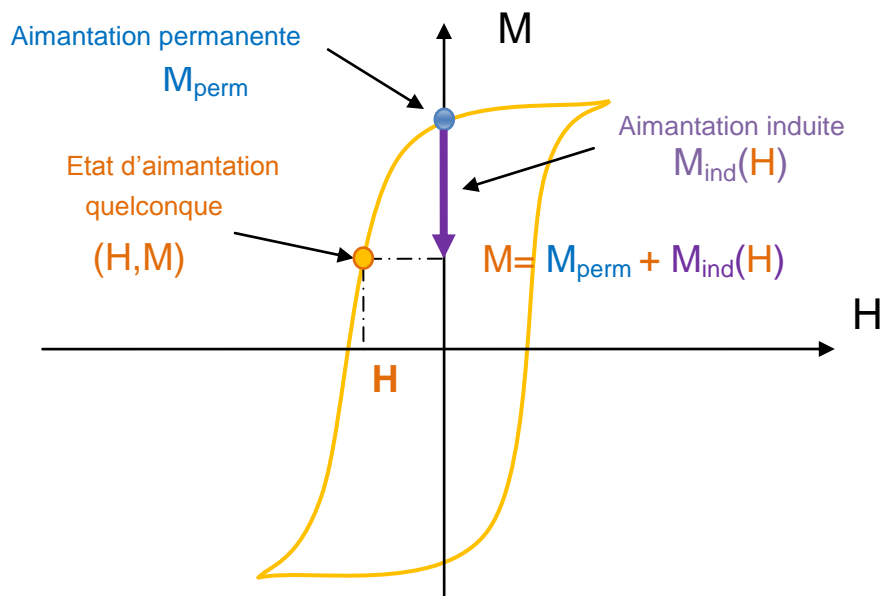


Figure 13 – Distinction entre M_{perm} et M_{ind}

Par la suite, on distinguera les champs magnétiques créés par M_{ind} et M_{perm} , appelés respectivement B_{ind} et B_{perm} . De plus, on parlera plutôt du champ magnétique B que du champ d'excitation H : nous rappelons que dans le vide, en dehors de la matière aimantée, ces deux grandeurs sont simplement reliées par la constante μ_0 . Dans l'air, en dehors de la matière aimantée, cette relation est une très bonne approximation de la réalité.

III.2 Signatures magnétiques des véhicules

Un véhicule est un objet magnétique complexe, composé de masses métalliques, dont certaines sont plutôt en matériau ferromagnétique doux, comme par exemple la carrosserie, et d'autres sont plutôt en matériau ferromagnétique dur, comme par exemple le moteur thermique, ou les essieux. Un véhicule comporte aussi un grand nombre d'aimants permanents (Figure 14).

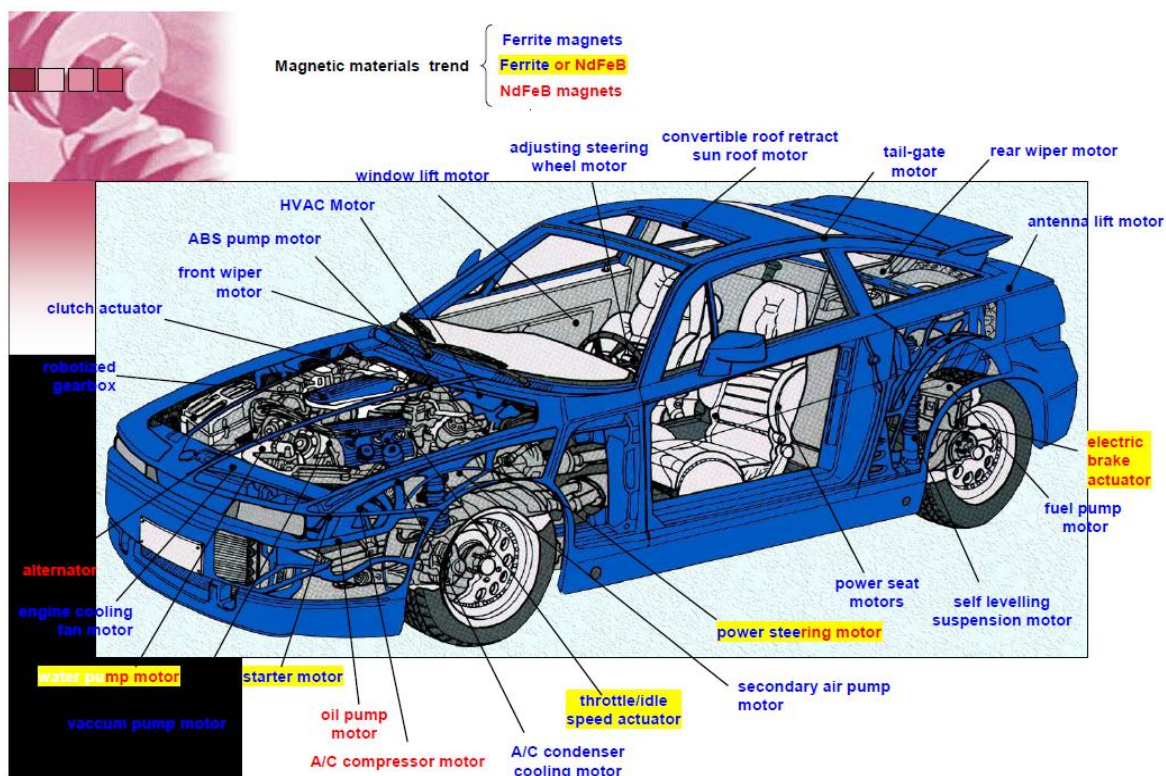


Figure 14 – Illustration de la présence d'aimants dans les nombreux petits moteurs faisant partie d'un véhicule (Source [YON09])

Toutes ces masses s'aimantent et perturbent le champ magnétique terrestre B_{Ter} (Figure 15) [WHI89]. Ainsi, quand un véhicule passe au-dessus d'un capteur magnétique posé ou inséré dans la route, le champ B mesuré par le capteur varie : il mesure alors la somme de B_{Ter} et du champ magnétique généré par le véhicule B_{vh} (Figure 16). Pour un véhicule léger, B_{vh} est un signal d'amplitude de l'ordre de 25 à 150 μT , i.e. de l'ordre d'un demi à trois fois le champ magnétique terrestre. B_{vh} est appelé signature magnétique du véhicule.



Figure 15 – Perturbation du champ magnétique terrestre en présence d'un objet métallique

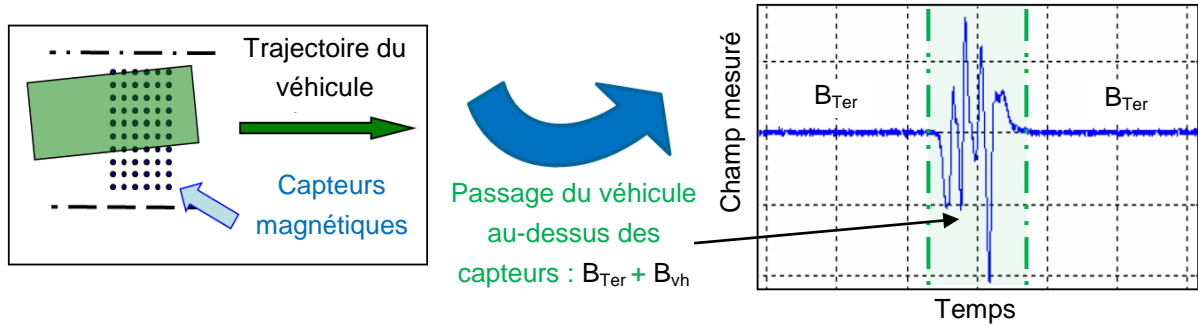


Figure 16 – Variation du champ magnétique mesuré par un capteur magnétique mono-axe lors du passage d'un véhicule

La Figure 17 montre la variation des signatures magnétiques mesurées pour deux véhicules différents.

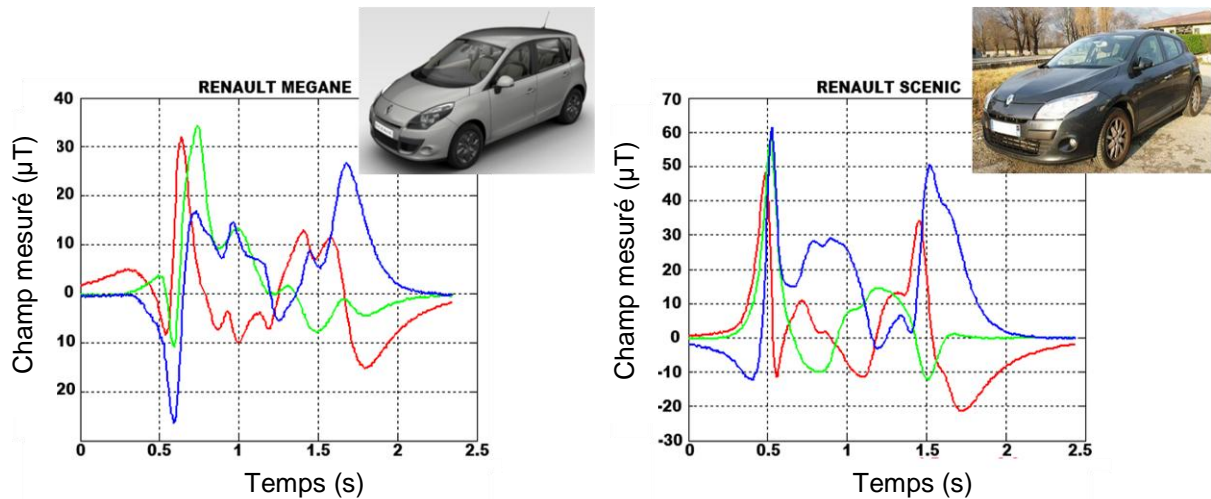


Figure 17 – Variation des signatures magnétiques d'un véhicule à l'autre, mesurées par des capteurs tri-axes

Compte tenu de sa composition, qui mêle matériaux ferromagnétiques doux et matériaux ferromagnétiques durs, on s'attend à ce que l'aimantation d'un véhicule soit composée d'une part d'aimantation induite M_{ind} (qui dépend de B_{Ter}) et d'une part d'aimantation permanente M_{perm} [ALT93, LAO96, HOS96, PHA97, CAR99, CAS02, MER03, KAO06]. On peut alors exprimer B_{vh} de la façon suivante :

$$\vec{B}_{vh} = \vec{B}_{perm} + \vec{B}_{ind} = \vec{B}(\vec{M}_{perm}) + \vec{B}(\vec{M}_{ind}(\vec{B}_{Ter})) \quad (10)$$

L'aimantation permanente est très favorable à une application de ré-identification : comme elle dépend de l'histoire du matériau, elle sera en théorie différente d'un véhicule à l'autre, même si ces véhicules sont de même modèle. Ainsi, si M_{perm} est majoritaire dans un véhicule, le signal mesuré au passage d'un véhicule sera bien associé à ce véhicule, et l'on pourra employer le terme de « signature magnétique » et l'utiliser pour ré-identifier.

La part d'aimantation induite d'un véhicule est par contre perturbante pour l'application de ré-identification : l'aimantation induite dans le plan horizontal va en effet faire varier la signature du

véhicule en fonction de son orientation dans le champ magnétique terrestre, et l'aimantation induite verticale la fera varier si le véhicule n'est pas dans le plan horizontal (cas d'une pente). Dans cette étude, nous allons nous placer dans le cas où le véhicule reste dans le plan horizontal : seule l'aimantation induite dans le plan horizontal pourra donc déformer les signatures. L'aimantation induite sur l'axe vertical Z ne pourra être distinguée de l'aimantation permanente sur Z, et elles contribueront toutes deux à la bonne ré-identification des véhicules.

Si la part d'aimantation induite dans le plan horizontal est prépondérante, la ré-identification sera difficile dès que le véhicule change d'orientation entre les deux points de mesure (ce qui est le cas lorsqu'on calcule les matrices origine-destination à un carrefour) car la forme de la signature sera modifiée de manière importante. Il est donc nécessaire d'évaluer l'influence de l'orientation du véhicule par rapport au champ magnétique terrestre sur les performances de nos algorithmes de ré-identification. Dans le cas des tanks [ALT93, MER03, RCC03], l'aimantation induite est effectivement majoritaire, mais cela provient d'un procédé appliqué volontairement lors de la fabrication des tanks, de façon à réduire au maximum l'aimantation permanente et ainsi à augmenter leur furtivité. Les véhicules civils étant fabriqués sans utiliser ce procédé particulier, nous faisons l'hypothèse que leur part d'aimantation induite sera réduite.

De plus, les signatures varient en fonction de la position du capteur sur l'axe latéral de la route, perpendiculaire au passage du véhicule (Figure 18). Cela était prévisible car le champ B généré par un objet aimanté dépend de la position du capteur par rapport à l'objet (équation (6)).

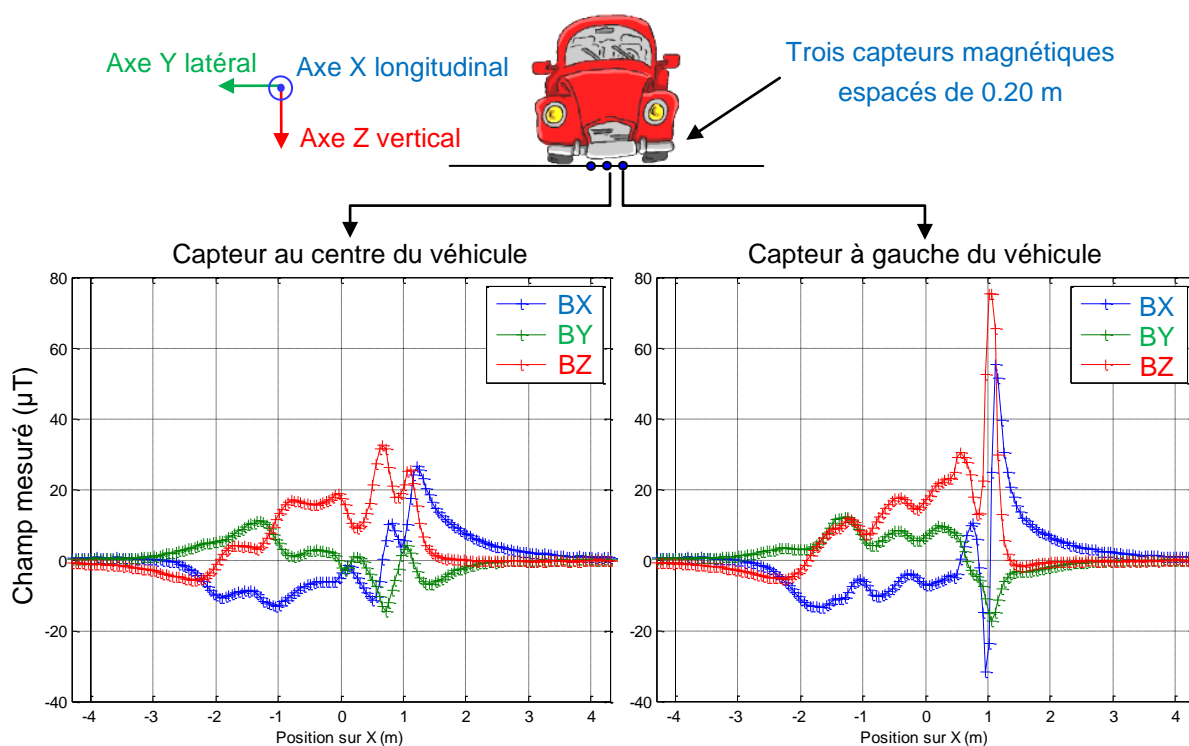


Figure 18 - Comparaison de la signature magnétique tri-axe d'un véhicule Renault Twingo mesurée par deux capteurs espacés de 0.20 m

Dans une application de ré-identification sur trafic routier réel, la position latérale du véhicule pourra naturellement varier d'un point de mesure à l'autre. Il est donc important de vérifier l'influence

du décalage latéral du véhicule sur les performances de nos algorithmes de ré-identification, et de tenir compte de cette influence pour définir la configuration finale des capteurs magnétiques.

III.3 Choix du capteur magnétique

L'acquisition de la signature magnétique se fait à l'aide de capteurs magnétiques. Plusieurs types de capteurs pouvant être miniaturisés existent. Nous allons détailler leurs avantages et inconvénients respectifs et présenter le type de capteur qui a été retenu pour la suite de l'étude.

III.3.a Caractéristiques du signal mesuré

Le CEA/Leti a eu l'occasion de mesurer des signatures de véhicules allant de la moto au camion. Nous en avons extrait les caractéristiques des signaux qui seront mesurés par les capteurs magnétiques placés dans la route.

L'amplitude maximale atteinte par ces signaux est de quelques centaines de μT , ce qui correspond à un ou deux champs terrestres. Les plus petites variations significatives des signaux sont quant à elles de l'ordre de $0.1\mu\text{T}$.

Si l'on étudie ensuite le spectre des signatures magnétiques spatiales (Figure 19), on observe que pratiquement toute l'information est contenue dans les fréquences spatiales inférieures à 5 m^{-1} . Pour passer de cette fréquence spatiale maximale (en m^{-1}) à la fréquence temporelle maximale (en Hz ou s^{-1}) du signal, il nous reste à fixer une vitesse de passage maximale des véhicules (en m/s). Dans une application de ré-identification sur autoroute, on fixe la vitesse maximale à 150km/h , soit 42m/s , ce qui correspond à une fréquence temporelle maximale de 210Hz .

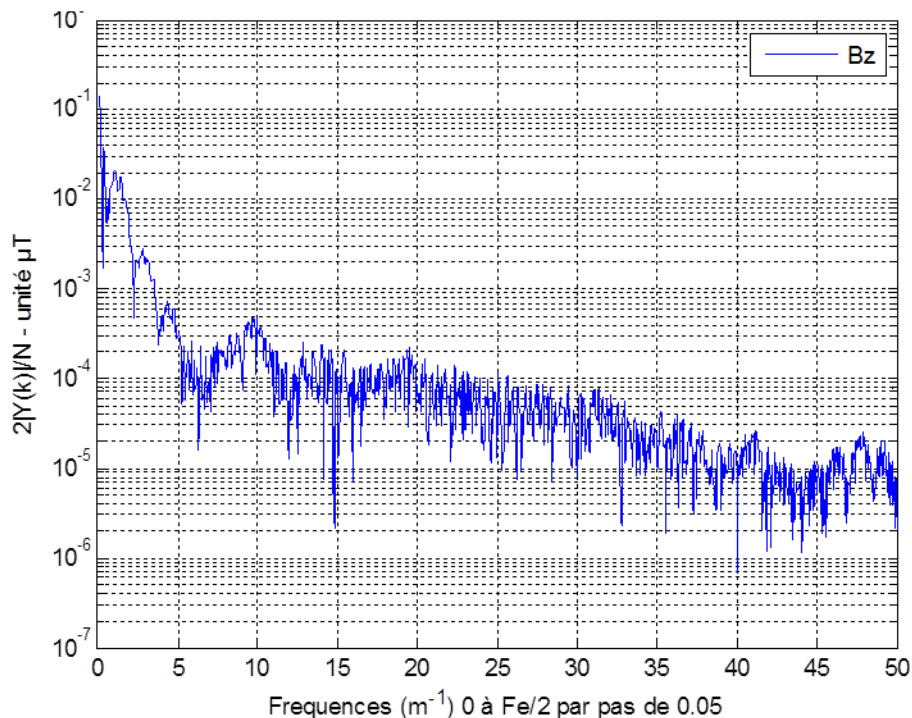


Figure 19 – Spectre d'une signature spatiale mesurée sur l'axe vertical Z ($N = 2048$)

Ces caractéristiques vont permettre de choisir un capteur magnétique adapté aux signaux à mesurer. Ainsi, l'amplitude maximale des signaux doit être comprise dans la gamme⁴ du capteur et les plus petites variations significatives doivent être supérieures à sa résolution⁵ R .

La fréquence temporelle maximale du signal correspond, elle, à la bande passante BP nécessaire, ce qui va nous permettre de passer de la résolution du capteur à sa densité de bruit⁶ DB. En effet, si l'on suppose que la densité de bruit du capteur est constante sur toute la plage de fréquence de la BP, on a alors :

$$R = DB * \sqrt{BP} \quad (11)$$

$$\text{soit } DB = \frac{R}{\sqrt{BP}} \approx 6.9 \text{ nT} / \sqrt{\text{Hz}} \text{ avec } R = 0.1 \mu\text{T} \text{ et } BP \approx 210 \text{ Hz} \quad (12)$$

Notons de plus que nous allons chercher à comparer les signatures magnétiques mesurées par au moins deux capteurs différents. Il faut donc que la mesure du capteur choisi soit aussi proche de la réalité et aussi indépendante de l'environnement extérieur que possible. La dérive en température⁷ et la sensibilité aux chocs magnétiques sont deux caractéristiques qui indiquent à quel point la mesure du capteur dépend de l'environnement extérieur.

III.3.b Principales familles de micro-magnétomètres

Les principaux types de capteurs magnétiques, ou « magnétomètres », sont les suivants : les micro-magnétomètres à effet Hall, les magnéto-résistances, et les capteurs fluxgate. Leurs caractéristiques les plus importantes se trouvent dans le Tableau 2.

Les capteurs à effet Hall sont des capteurs bas coût. Ils exploitent l'effet Hall, phénomène physique qui se produit lorsqu'un matériau conducteur parcouru par un courant électrique I est plongé dans un champ d'induction magnétique B : il y a alors génération d'une tension sur les faces latérales du matériau. Cette tension est proportionnelle, et perpendiculaire, au champ B et au courant I . Toutefois, ces capteurs ont une densité de bruit élevée par rapport aux caractéristiques attendues.

Les magnéto-résistances existent essentiellement sous deux formes : les magnéto-résistances anisotropes (AMR) et les magnéto-résistances géantes (GMR). Dans les deux cas, on utilise des matériaux qui ont pour propriété d'avoir une résistance électrique qui varie en fonction du champ magnétique extérieur. Notons que ces capteurs sont sensibles aux chocs magnétiques et à la température.

⁴ Plage des mesures de champs magnétiques qui sont possibles avec le capteur

⁵ Plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur

⁶ Densité spectrale du bruit présent dans le signal, rapporté à une bande passante de 1Hz.

⁷ Mesure de la variation de la sensibilité du capteur en fonction de la température (sensibilité : rapport entre la tension de sortie du capteur et la grandeur physique mesurée, ici des Teslas)

	Effet Hall	Magnéto-résistances		Micro-fluxgate	Attendu
		AMR	GMR		
Gamme	100 μT – 10 T	0.1 μT – 1 mT	1 μT – 10 mT	0.1 nT – 1 mT	100 μT – 1 mT
Densité de bruit	10 nT – 100 μT / $\sqrt{\text{Hz}}$	1 – 10 nT / $\sqrt{\text{Hz}}$		1 nT / $\sqrt{\text{Hz}}$	6.9 nT / $\sqrt{\text{Hz}}$
Dérive en température	100-1000 ppm / $^{\circ}\text{C}$	3000 ppm / $^{\circ}\text{C}$		< 100 ppm / $^{\circ}\text{C}$	Plus faible possible
Sensibilité chocs magnétiques	Faible	Forte		Faible	Plus faible possible
Coût en 2010	0.1 – 5 \$ (0.08 – 3.8 €)	1 – 10 \$ (0.8 – 7.6 €)		10 – 100 \$ (7.6 – 76 €)	Coût capteur + installation < 380€

Tableau 2 – Principales caractéristiques des micro-magnétomètres [LEG11, MSA09, JAG07]

Les capteurs fluxgate (« portes de flux ») sont fabriqués à partir de matériaux ferromagnétiques très doux, qui peuvent être facilement aimantés jusqu'à saturation (aimantation $\pm M_s$). Une première bobine est entourée autour du matériau : elle est parcourue par un courant alternatif, qui va aimanter périodiquement le matériau en $+M_s$ puis $-M_s$ à la même fréquence que le courant. Une deuxième bobine est placée autour du matériau : elle n'est pas alimentée, et la tension à ses bornes est nulle en l'absence de champ magnétique extérieur B_{ext} . Un B_{ext} non nul déséquilibre l'alternance régulière entre $+M_s$ et $-M_s$, ce qui se traduit par l'apparition d'impulsions de tension aux bornes de la deuxième bobine. Même s'ils perdent en précision lorsqu'ils sont intégrés, les capteurs micro-fluxgates restent peu sensibles à la température et aux chocs magnétiques. Par contre, ils sont pour l'instant toujours à l'état de prototype et coûtent chers (pour information, les Fluxgates non intégrés coûtent eux de plusieurs centaines à plusieurs milliers d'euros pièce, et peuvent atteindre des densités de bruit de 10 pT / $\sqrt{\text{Hz}}$).

Compte-tenu des contraintes de coût et des caractéristiques des signatures magnétiques de véhicules, qui n'étaient pas extrêmes, un très bon capteur Effet Hall ou un AMR pouvaient être choisis. Le CEA/Leti ayant une plus grande expérience des AMR, ce sont ces derniers qui ont été sélectionnés pour mesurer nos signaux. Pour pallier à leur sensibilité aux chocs magnétiques, un système de réinitialisation (« reset ») leur a été associé. De plus, un capteur de température sera ajouté aux cartes électroniques qui auront vocation à rester dans la route, de façon à pouvoir corriger leurs mesures et obtenir une meilleure précision⁸.

Pour mesurer les signatures magnétiques des véhicules, nous avons utilisé des « Star Watch » (Figure 20), prototypes de capteurs sans fil conçus au CEA/Leti en 2006 à partir de capteurs AMR de la marque Honeywell. Les Star Watch sont des capteurs tri-axes, de fréquence d'échantillonnage Fe 200Hz (le capteur AMR d'Honeywell permettait un échantillonnage allant jusqu'à 1 MHz).

⁸ Capacité du capteur à donner une mesure proche de la réalité



Figure 20 – Photo d'un capteur Star Watch tri-axe

III.4 Conclusion

Nous venons de voir comment sont générées les signatures magnétiques de véhicules, composés de matériaux magnétiques, et quels sont les facteurs pouvant les faire varier. Les caractéristiques des signaux nous ont de plus permis de sélectionner un capteur adapté à nos mesures.

Dans la partie suivante, nous allons décrire les signatures que nous avons mesurées et utilisées pour élaborer et évaluer les algorithmes de ré-identification de véhicules.

IV. Signatures de véhicules – Données expérimentales

Dans ce chapitre, nous allons décrire les données expérimentales qui nous serviront ensuite à étudier les algorithmes de ré-identification. En effet, nous avons besoin de mesurer des signatures de véhicules, car il n'y a pas de modèle de véhicule reconnu permettant de les simuler.

IV.1 Une matrice de capteurs magnétiques

Au cours de la thèse, deux campagnes de mesure ont été réalisées. Pour chacune d'elles, les capteurs magnétiques ont été organisés sous forme d'une matrice, composée au minimum d'une ligne de capteurs et d'un capteur aligné sur l'axe de passage du véhicule (Figure 21).

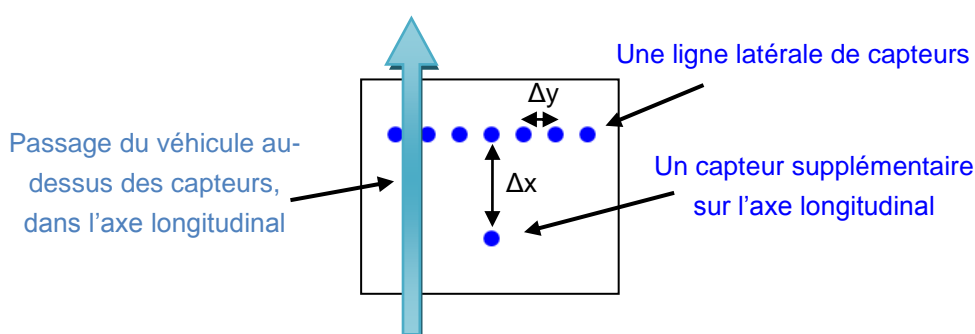


Figure 21 – Schéma en « T » d'une matrice minimaliste vue de dessus, composée d'une ligne latérale de capteurs et d'un capteur supplémentaire sur l'axe longitudinal

Le capteur supplémentaire sur l'axe longitudinal permet d'évaluer la vitesse de passage du véhicule, évaluation qui était nécessaire pour certaines de nos méthodes de ré-identification. Ainsi, la vitesse v est estimée à partir de Δt , le retard temporel entre deux signatures mesurées par les deux capteurs espacés d'une distance Δx sur l'axe longitudinal. Le retard Δt est calculé à partir de l'intercorrélation entre ces deux signatures.

La ligne latérale de capteurs vise à s'affranchir des variations du décalage latéral du véhicule : comme il ne passera pas toujours exactement au-dessus du même capteur, l'idée est d'avoir pour chaque passage du véhicule plusieurs choix de signatures mesurées avec différents décalages latéraux Δy .

Il pourrait également être intéressant, mais coûteux, d'avoir une matrice de capteurs avec plusieurs lignes latérales. En effet, cette configuration donne accès à une image spatiale grossière du véhicule, permet de vérifier l'estimation de vitesse par intercorrélation, et est capable de gérer un décalage latéral dynamique d'un véhicule qui passerait en diagonale au-dessus des capteurs. Cette solution n'a toutefois pas été retenue dans notre étude.

Quelle est l'influence de la fréquence d'échantillonnage du capteur sur la vitesse maximale de passage des véhicules ? Nous rappelons que pratiquement toute l'information des signatures est contenue dans les fréquences inférieures à 5 m^{-1} . D'après le théorème de Shannon, échantillonner la signature tous les 0.1 m sur l'axe longitudinal suffit donc à conserver toute l'information. Ainsi, la

vitesse du véhicule doit être telle que le véhicule se déplace de moins de 0.1m entre deux mesures du même capteur. Nos capteurs ayant une fréquence d'échantillonnage de 200Hz, la vitesse maximale des véhicules est alors de 20 m/s, soit 72 km/h. Ces capteurs permettent donc une application de ré-identification en ville, mais ne seront pas échantillonnés assez rapidement pour une application de ré-identification sur routes nationales et sur autoroutes.

IV.2 Configuration de janvier 2011

Une première campagne de mesures de signatures magnétiques de véhicules a été effectuée en janvier 2011.

Lors de cette campagne, une matrice de 10 capteurs magnétiques tri-axes a été utilisée (Figure 22). Ces capteurs étaient fixés sur une plaque en plastique de largeur 0.60m : cela a fortement contraint la position latérale des véhicules, ainsi que leur vitesse de passage, qui est restée lente et constante. Notons que la plaque support offrait la possibilité de positionner les capteurs sur 25 emplacements différents. Dans la configuration choisie, les capteurs étaient espacés de 0.25m.

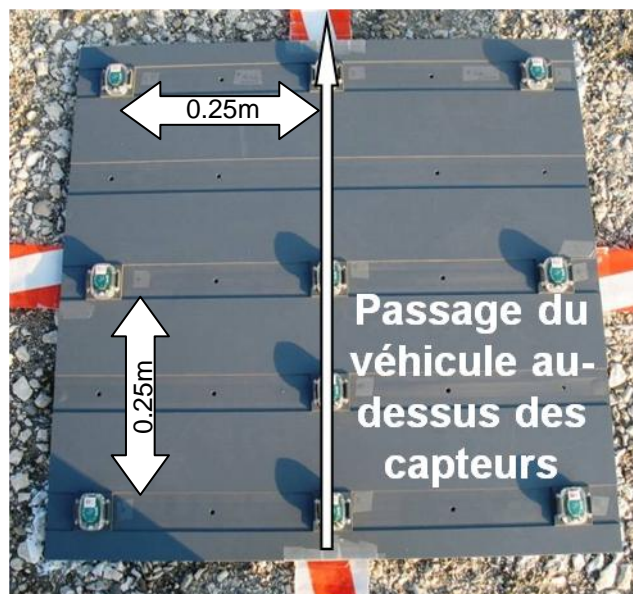


Figure 22 – Plaque de 10 capteurs magnétiques tri-axes sans fil

Vingt-cinq voitures allant de la petite citadine au monospace ont roulé au-dessus des capteurs magnétiques, dans quatre orientations différentes par rapport au champ magnétique terrestre : du Nord vers le Sud, du Sud vers le Nord, de l'Est vers l'Ouest, et de l'Ouest vers l'Est (Figure 23).

Chaque véhicule est passé en moyenne trois fois au-dessus des capteurs pour chacune des quatre orientations : nous avons donc enregistré environ 250 signatures magnétiques de véhicules au cours de cette campagne. Pour simplifier les notations, nous appellerons « NS » les signatures mesurées pour des véhicules roulant du Nord vers le Sud (respectivement « SN », « EO », « OE » pour les directions Sud vers le Nord, Est vers l'Ouest, et Ouest vers l'Est).

La Figure 23 définit également le référentiel tri-axe utilisé dans cette étude : l'axe X est l'axe longitudinal, dans le sens de passage du véhicule, l'axe Y est l'axe latéral, perpendiculaire au sens de passage du véhicule, et l'axe Z est l'axe vertical, orienté vers le bas.

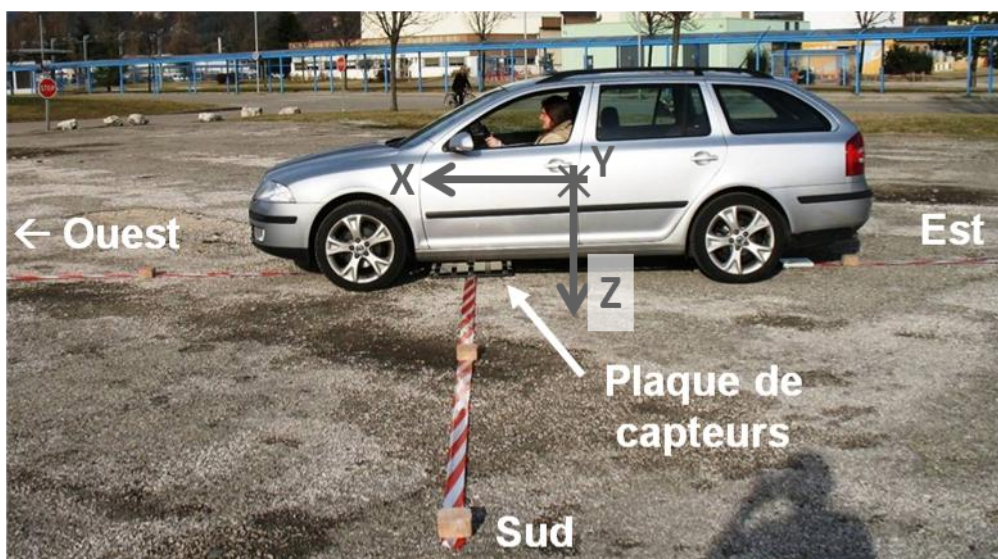


Figure 23 – Passage d'un véhicule Skoda Octavia Break, orienté vers l'Ouest ; les rubans de chantier aident le conducteur à suivre les orientations.

Notons que contrairement au cas de l'application finale, où les paires de signatures comparées seront obtenues en deux points de mesure distincts, nos mesures ont été effectuées en un seul point de mesure : chaque véhicule doit donc passer plusieurs fois au-dessus des capteurs pour simuler une configuration de ré-identification. C'est un cas plutôt idéal car on n'a pas à prendre en compte la dispersion due à des capteurs différents entre l'enregistrement de la 1^{ère} et de la 2^{ème} signature.

IV.3 Configuration de mars 2012

Après une évaluation des méthodes de ré-identification avec les mesures de janvier 2011, une deuxième campagne de mesures de signatures magnétiques de véhicules a été effectuée en mars 2012. Elle visait à compléter nos données de janvier 2011, en étudiant plus finement l'influence du décalage latéral sur les performances des méthodes de ré-identification, et en facilitant l'approche par modélisation dipolaire.

Lors de cette campagne, une configuration de 10 capteurs magnétiques tri-axes a été utilisée (Figure 24).

Six capteurs étaient de nouveau fixés sur une plaque au-dessus de laquelle les véhicules roulaient. Cependant la plaque en bois était cette fois-ci de largeur moindre, 0.44m, de façon à ce que les véhicules soient relativement moins contraints en termes de vitesse et de décalage latéral. De plus, les capteurs étaient moins espacés : 0.10m (au lieu de 0.25m en janvier 2011).

En complément, deux tours amagnétiques en plastique ont été installées de part et d'autre du véhicule, de façon à mesurer la signature magnétique depuis les côtés du véhicule. Les schémas Figure 25 et Figure 26 précisent la position des 10 capteurs.



Figure 24 – Passage d'un bus, orienté vers l'Est ; les capteurs sont situés sous le véhicule, mais également sur ses côtés.

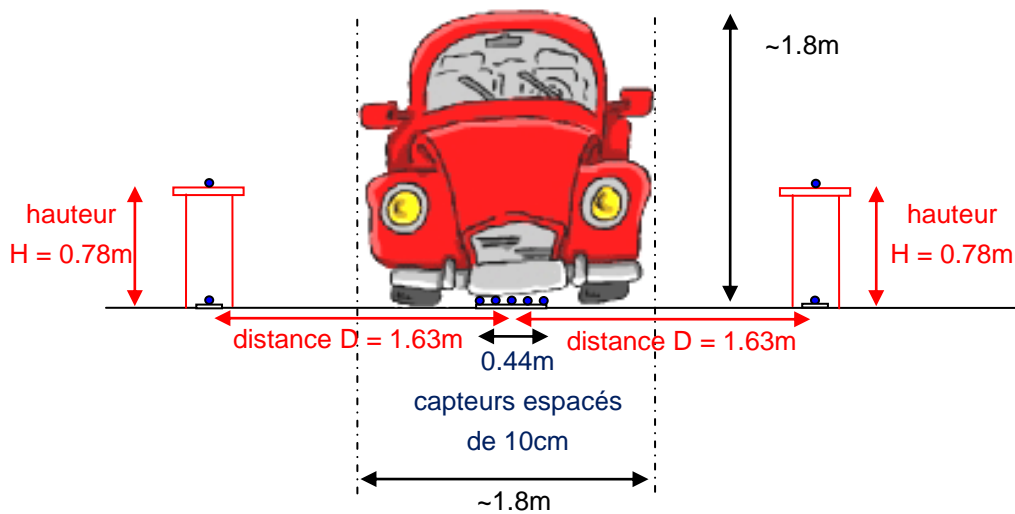


Figure 25 – Configuration des capteurs, vue de face.

Dix-sept véhicules allant de la petite citadine au bus ont roulé au-dessous des capteurs magnétiques, dans deux orientations différentes par rapport au champ magnétique terrestre : du Sud vers le Nord (SN), et de l'Ouest vers l'Est (OE).

Chaque véhicule est passé trois fois au-dessus des capteurs à vitesse lente et constante, puis une fois à vitesse plus rapide et constante, et enfin une fois en accélérant, et ce pour chacune des deux orientations : nous avons donc enregistré environ 170 signatures magnétiques de véhicules au cours de cette campagne.

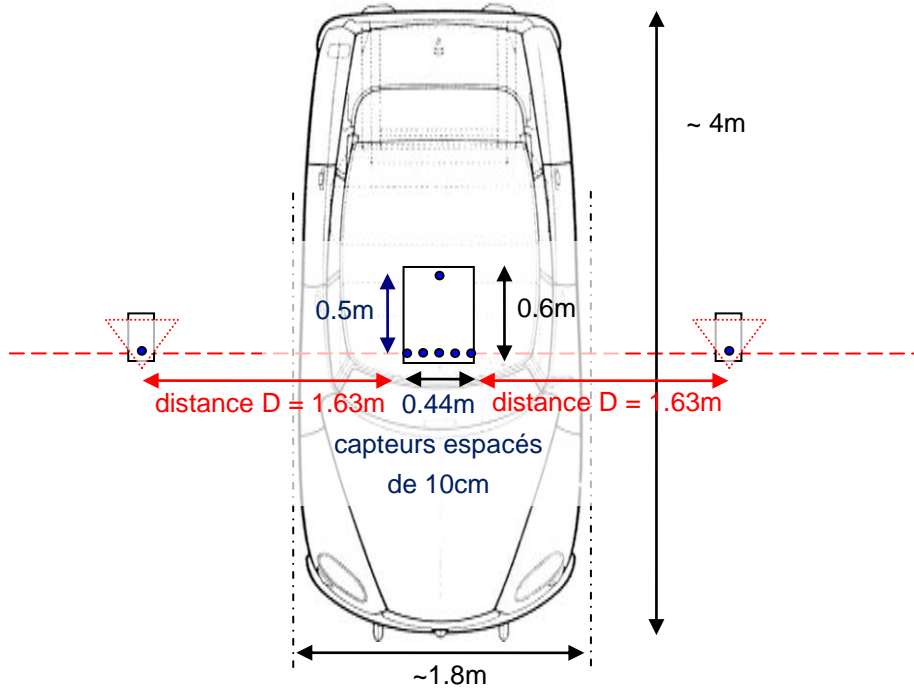


Figure 26 – Configuration des capteurs, vue de dessus.

IV.4 Acquisition des signatures magnétiques

Voyons à présent quels étaient les étapes et prétraitements nécessaires pour extraire les signatures des données mesurées par les capteurs.

IV.4.a Calibration des capteurs

La première étape consiste à convertir les données qui sortent des capteurs, à savoir des variations de volts (V), en unité physique (μT). Pour cela, on effectue une calibration des capteurs magnétiques, à l'aide de la méthode Merayo [MER00, BON09]. Cette méthode permet également de compenser les non-orthogonalités des axes des capteurs.

Notre but est de connaître le champ magnétique B projeté sur un repère orthogonal $\{b\}$, à partir du vecteur v des volts en sortie des trois axes du capteur. Or les axes du capteur peuvent former un repère capteur non-orthogonal $\{c\}$: en sortie du capteur, v dépend alors de B_c , la projection de B sur les axes de $\{c\}$:

$$\vec{v} = K \cdot \vec{B}_c + \vec{o} \quad (13)$$

avec K la matrice de sensibilité des axes du capteur (en V/T)

et \vec{o} le vecteur des offsets du capteur (en V)

Pour passer du repère orthogonal $\{b\}$ au repère capteur non-orthogonal $\{c\}$, on définit une matrice triangulaire T :

$$\{c\} = T \cdot \{b\} \text{ d'où } \vec{B}_c = T \cdot \vec{B} \quad (14)$$

Ainsi, on déduit l'expression de B à partir de v :

$$\vec{B} = [K \cdot T]^{-1} \cdot (\vec{v} - \vec{o}) = A \cdot (\vec{v} - \vec{o}) \quad (15)$$

Le but de l'étape de calibration du capteur est donc de connaître A et o, les matrices de calibration qui convertissent les volts (V) en unité physique (μT) et qui compensent les non-orthogonalités des axes des capteurs.

Pour obtenir les données nécessaires à la calibration, il faut faire tourner plusieurs fois les capteurs autour de leurs 3 axes X, Y, Z, de façon à ce qu'ils mesurent le champ magnétique local (très majoritairement dû au champ magnétique terrestre B_{Ter}) avec un maximum d'orientations différentes. Les capteurs de type AMR étant sensibles à la température, nous avons effectué un enregistrement des données de calibration avant chaque demi-journée de mesures de signatures.

IV.4.b Chaîne de prétraitements des signatures temporelles

Après avoir mesuré les données nécessaires à la calibration, nous avons enregistré les signatures magnétiques des véhicules. Concrètement, chaque fichier de données contenait les sorties des capteurs pour plusieurs passages d'un même véhicule, avec une orientation donnée (ex. NS).

Les données sont tout d'abord normalisées à l'aide la méthode Merayo et des matrices de calibration A et o calculées précédemment. Ensuite, nous avons vu au chapitre III.2 que lors du passage d'un véhicule, les capteurs mesurent la somme de B_{Ter} et du champ magnétique généré par le véhicule B_{vh} . Pour être plus précis, les capteurs mesurent la somme du champ magnétique local (dû majoritairement au champ terrestre B_{Ter}), et de B_{vh} . Ainsi, l'étape suivante des prétraitements consiste à soustraire le champ magnétique local pour ne garder que les variations dues au véhicule.

Pour évaluer le champ magnétique local, nous avons calculé la moyenne du champ mesuré par les capteurs au cours de la 1^{ère} seconde de chaque fichier de mesure (Figure 27). Après soustraction du champ local, les signaux mesurés par les trois axes du capteur X, Y, Z sont centrés sur 0 (Figure 28).

Il reste ensuite à détecter puis segmenter les signatures magnétiques parmi les données mesurées. La détection se fait par seuillage : si la norme de la mesure dépasse un certain seuil, alors on considère que l'on a détecté une signature magnétique (Figure 29).

La segmentation des signatures repose également sur un seuillage, associé à des fenêtres glissantes (Figure 30) [ROB00]. Pour définir le début de la signature, on va rechercher un dépassement du seuil sur une fenêtre glissante de 20 échantillons consécutifs de la mesure : le début de la signature ainsi que les 19 échantillons suivants doivent tous dépasser le seuil choisi. Pour définir la fin de la signature, on va rechercher un non-dépassement sur une fenêtre de 70 échantillons consécutifs de la mesure : la fin de la signature ainsi que les 69 échantillons suivants doivent tous être en-dessous du seuil choisi. Ces nombres d'échantillons ont été déterminés empiriquement ; dans l'application finale de ré-identification, ils devront dépendre de la vitesse de passage du véhicule. Une fois le début et la fin de la signature fixés, l'étape de segmentation est terminée.

Pour finir, on calcule le vecteur temporel associé aux signatures, en convertissant le nombre d'échantillons en seconde. Il suffit pour cela de multiplier l'abscisse par T_e , la période d'échantillonnage. Enfin, les signatures sont exprimées dans le repère du véhicule (et plus dans celui du capteur) avant d'être enregistrées.

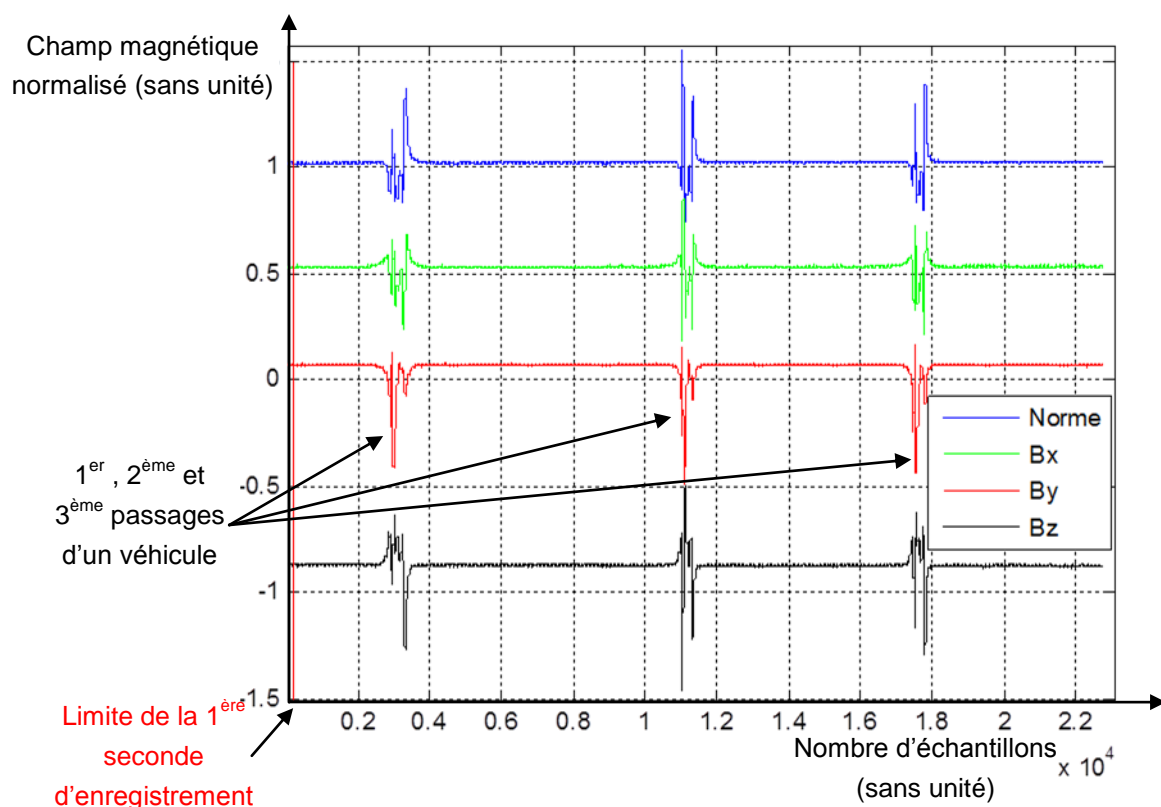


Figure 27 – Champ magnétique mesuré par un capteur sur ses 3 axes X, Y, Z, après normalisation ; la soustraction du champ magnétique local n'a pas encore été effectuée.

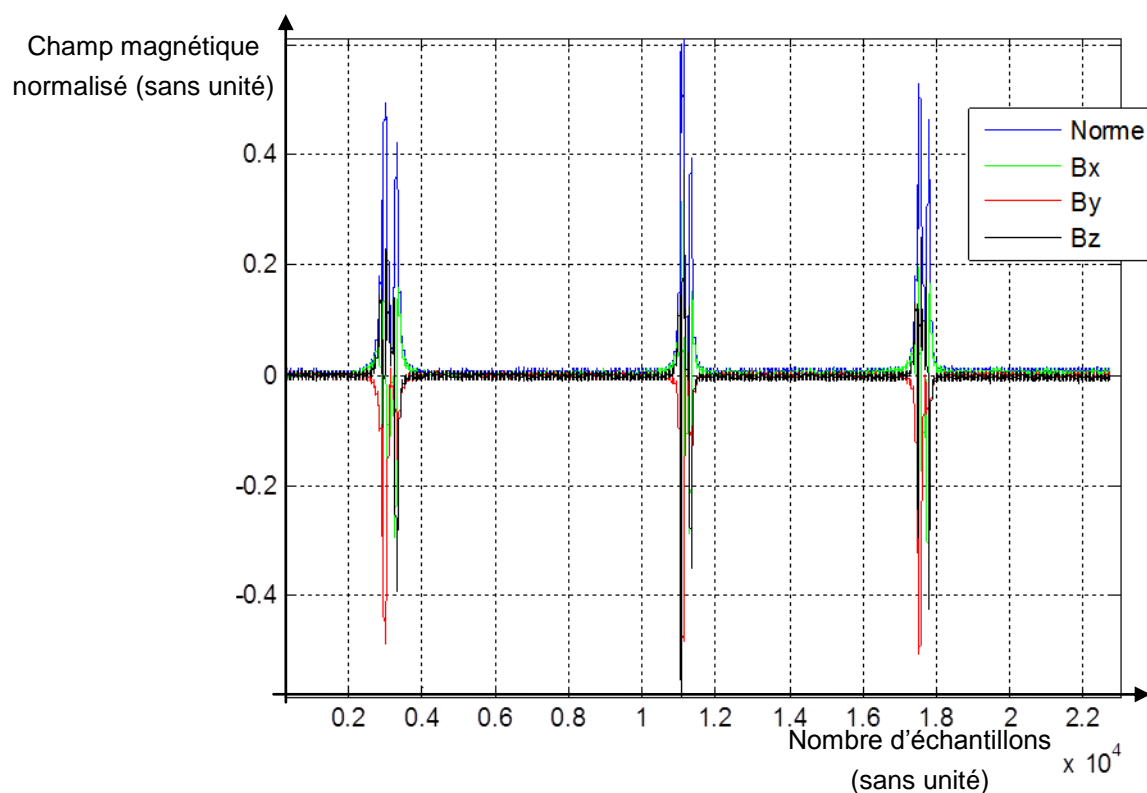


Figure 28 – Champ magnétique mesuré par les capteurs sur ses 3 axes X, Y, Z, après normalisation et soustraction du champ magnétique local : les signaux sont centrés sur 0.

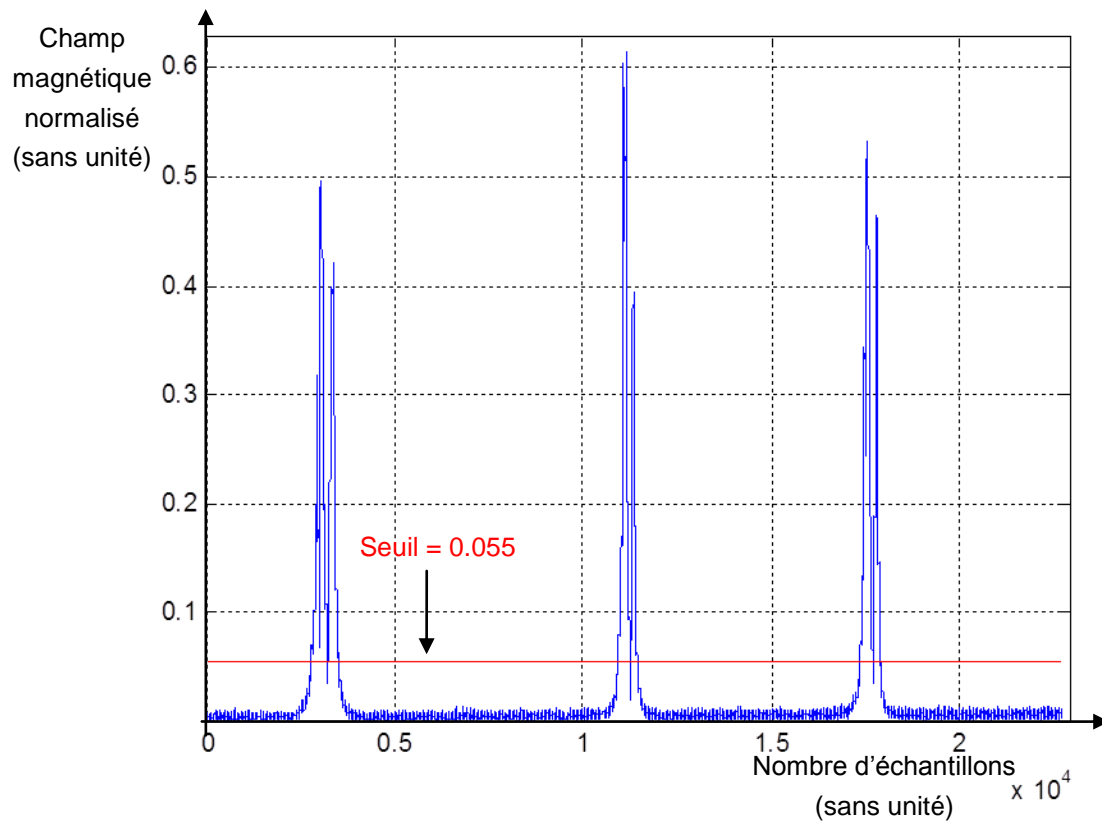


Figure 29 – Exemple de détection de signatures par seuillage : avec un seuil de 0.055, soit environ 2.5μT, on détecte 3 signatures dans cet enregistrement.

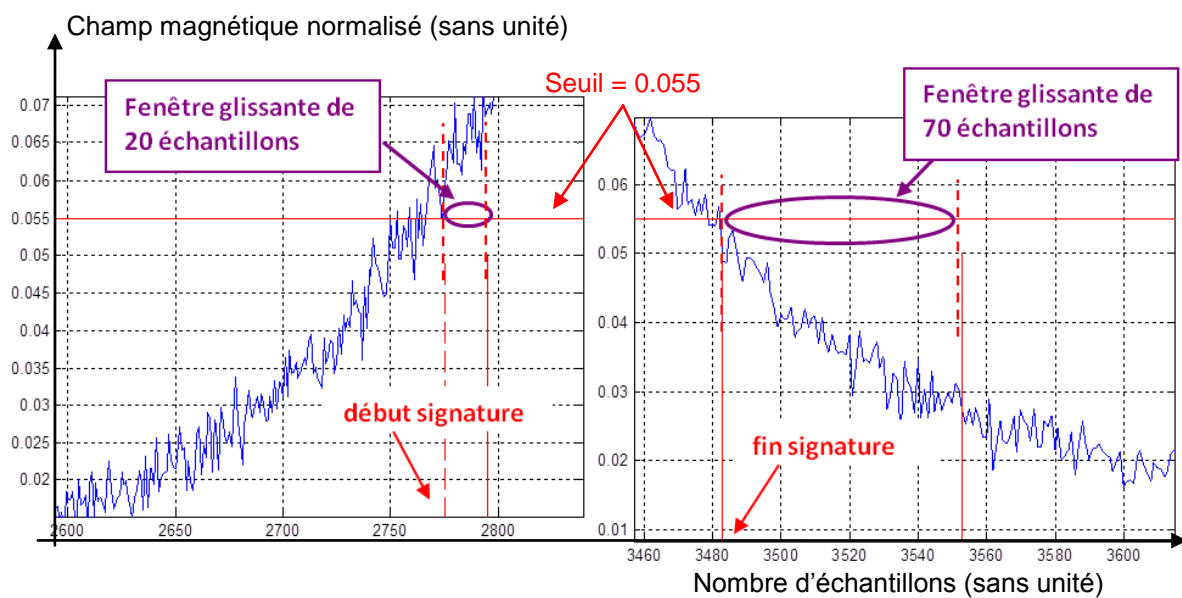


Figure 30 – Exemple de segmentation de signatures par seuillage sur fenêtre glissante, avec zoom sur le début et la fin de la signature.

IV.5 Conclusion

Dans cette partie, nous avons décrit les données expérimentales recueillies au cours de cette thèse. A la fin des prétraitements des données, les signatures magnétiques des véhicules sont prêtes à être utilisées dans une méthode de ré-identification par comparaison directe de paires de signatures temporelles, que nous allons étudier dans le chapitre suivant.

V. Ré-identification de véhicules par comparaison directe des signatures temporelles et spatiales

V.1 Introduction

L'objectif de ces travaux est de concevoir un système de ré-identification de véhicules à partir de signaux mesurés par des capteurs magnétiques placés dans la route. Ces signaux sont appelés « signatures magnétiques » car ils sont a priori caractéristiques d'un véhicule donné.

Compte-tenu de la nature des matériaux magnétiques du véhicule, il est toutefois possible que ces signatures varient en fonction de l'orientation du véhicule par rapport au champ magnétique terrestre. De plus, le champ magnétique généré dépend de la position relative du véhicule par rapport aux capteurs : il est donc possible que cette signature varie également en fonction de la position latérale du véhicule sur la chaussée. Ces variations risquent d'impacter les performances d'un algorithme de ré-identification.

Rappelons le principal général de la ré-identification d'un véhicule, décrit dans le chapitre « Trafic routier, contexte et enjeux » (§ II.) :

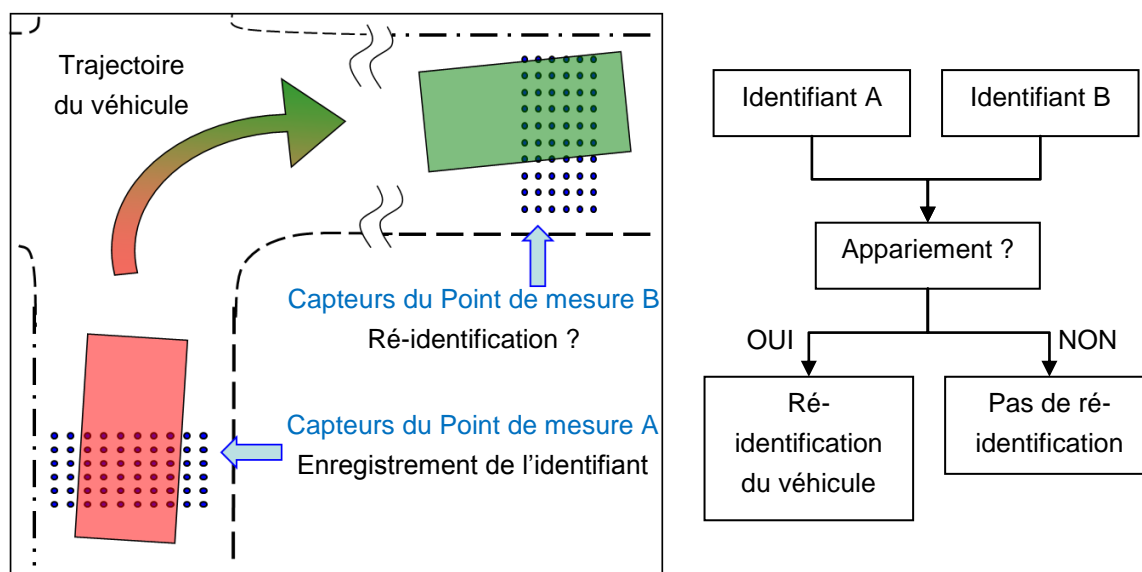


Figure 31 – Principe de la ré-identification d'un véhicule

Les capteurs sont placés en plusieurs endroits d'une route (par exemple aux entrées et sorties d'une autoroute), et l'on compare les « identifiants » des véhicules mesurés en ces différents endroits, afin de décider s'ils proviennent ou non du même véhicule.

Dans ce chapitre, les identifiants sont directement les signatures mesurées par les capteurs. Ces signatures peuvent être ou non transformées avant de calculer un critère de décision, qui permettra de déterminer si une paire de signatures provient ou non du même véhicule.

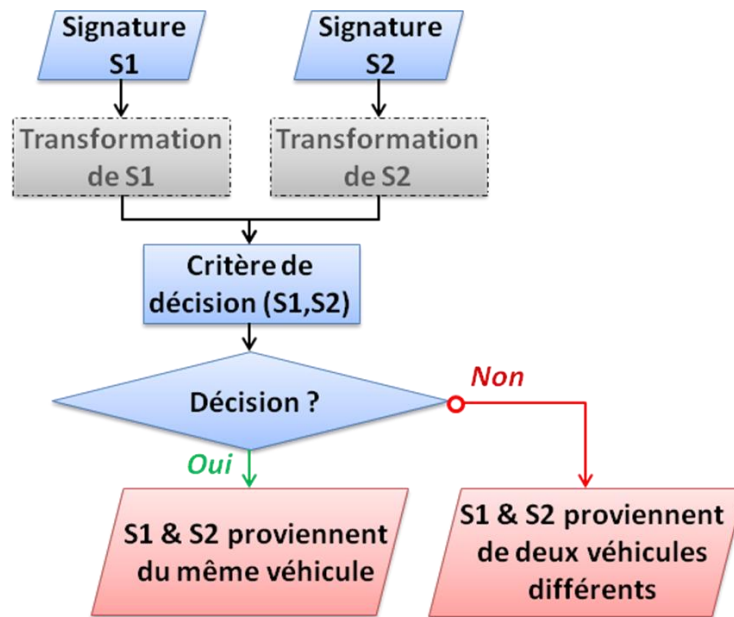


Figure 32 – Schéma du principe d'une ré-identification à partir de la comparaison d'une paire de signatures magnétiques, avec ou sans transformation préalable. Différents critères de décision peuvent être choisis.

Les critères de décision que nous avons choisis reposent soit sur un calcul de distance entre signatures, soit sur un calcul de similitude entre signatures. La décision se fera alors de la façon suivante :

- « Si la distance entre les deux signatures est inférieure à un certain seuil T_{dist} fixé, alors les deux signatures proviennent du même véhicule »,
- ou « Si la similitude entre les deux signatures est supérieure à un certain seuil T_{simi} fixé, alors les deux signatures proviennent du même véhicule ».

Dans la suite de ce chapitre, nous allons décrire les différentes distances entre paires de signatures que nous avons étudiées. Nous développerons ensuite nos méthodes d'évaluation des performances de ré-identification, avant de présenter les résultats obtenus par les méthodes testées.

V.2 Distances entre signatures

Un grand nombre de méthodes de comparaisons de paires de signaux sont décrites dans l'état de l'art [LIA05, FUT11]. La comparaison de paires de signatures mesurées par nos capteurs a été effectuée avec des méthodes « classiques » de calcul de distances ou de similitudes.

Nous allons tout d'abord définir la notion de « signature spatiale » ainsi que le prétraitement qui permet de passer d'une signature temporelle à une signature spatiale (V.2.a), puis faire un très rapide état de l'art sur les différentes façons de transformer (ou prétraiter) les signaux avant de les comparer (V.2.b), et enfin présenter nos choix de prétraitements et de calculs de distances entre paires de signatures (V.2.c).

V.2.a Prétraitements : d'une signature temporelle à une signature spatiale

Dans le cas d'une application de ré-identification de véhicules, il est important de définir la notion de « signature temporelle » et de « signature spatiale ».

Imaginons que nous ayons placé un capteur magnétique dans la route tous les $\Delta x_0 = 0.10\text{m}$ selon l'axe X longitudinal. Le véhicule est immobile au-dessus de ces capteurs, et nous mesurons alors sa signature magnétique à une période d'échantillonnage spatial Δx_0 de 0.10m.

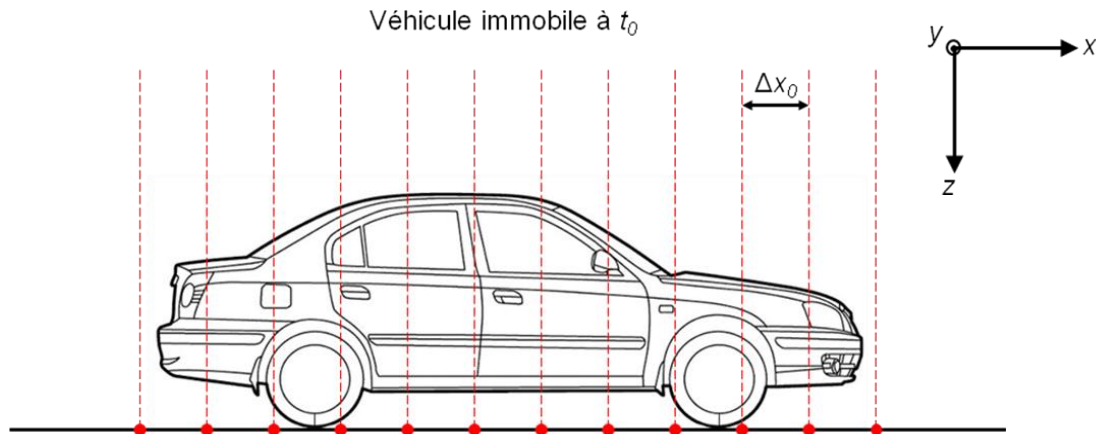


Figure 33 – Véhicule immobile au-dessus d'une ligne de capteurs magnétiques espacés d'une période d'échantillonnage spatial Δx_0 – Mesure de la signature spatiale

Cette signature est appelée « signature spatiale » du véhicule. Elle est exprimée en fonction d'une position, en mètre.

La « signature temporelle » correspond au signal mesuré lors du passage d'un véhicule au-dessus d'un unique capteur magnétique placé dans la route. Ce signal est exprimé en fonction du temps, et comporte un point à chaque période d'échantillonnage temporel $T_e = 1/F_e$.

Plus un véhicule ira vite, plus sa signature temporelle sera comprimée dans le temps, car pour une période d'échantillonnage donnée, le véhicule aura le temps de parcourir une distance plus grande. Le schéma ci-dessous illustre le passage d'un véhicule en accélération. En effet, la distance Δx_1 parcourue par le véhicule entre deux mesures t_0 et t_1 est plus petite que la distance Δx_2 parcourue par le véhicule entre deux mesures t_1 et t_2 : cela signifie que la vitesse moyenne v_1 atteinte par le véhicule entre t_0 et t_1 est inférieure à la vitesse moyenne v_2 atteinte par le véhicule entre t_1 et t_2 .

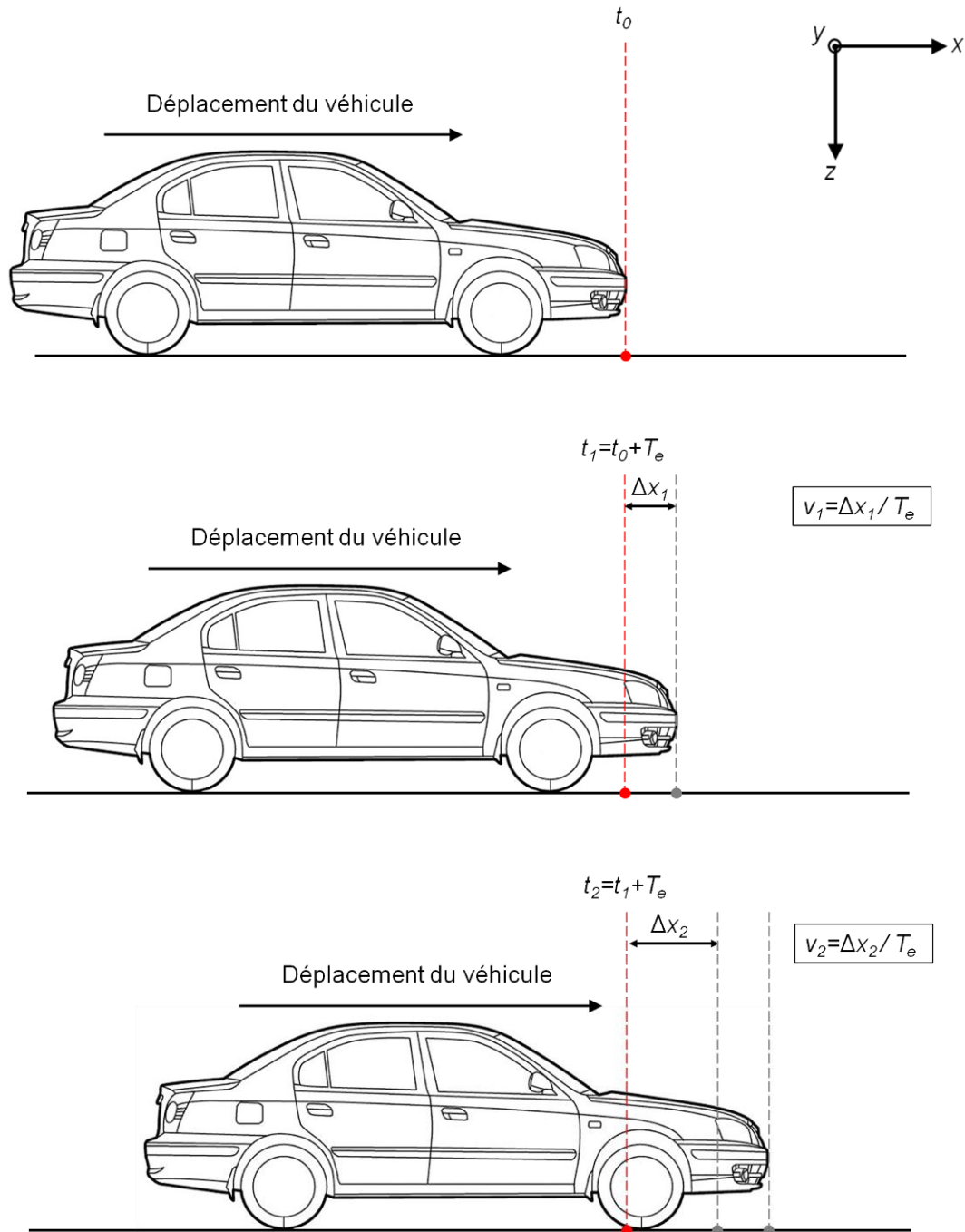


Figure 34 – Passage d'un véhicule en accélération au-dessus d'un capteur magnétique – Mesure de la signature temporelle

Dans le cas le plus simple où le véhicule roule à vitesse constante v au-dessus du capteur magnétique, $\Delta x_1 = \Delta x_2$. Si la période d'échantillonnage temporel T_e et la vitesse v sont connues, on peut alors calculer la période d'échantillonnage spatiale équivalente : $\Delta x_0 = v \cdot T_e$. La signature temporelle et la signature spatiale ainsi reconstruite se confondent, et leur seule différence est l'échelle des abscisses lorsqu'on les représente :

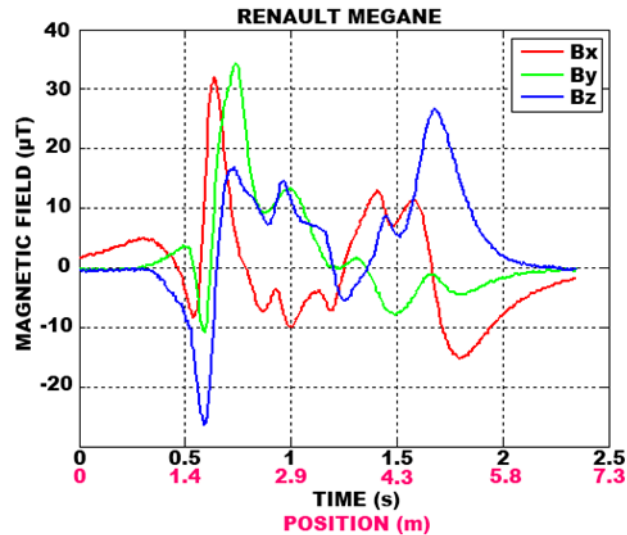


Figure 35 – Cas d'un véhicule passé à vitesse constante : une signature spatiale identique à sa signature temporelle, à l'échelle des abscisses près

Quels prétraitements avons-nous appliqués aux signatures temporelles mesurées lors de nos campagnes de mesures pour obtenir des estimations de signatures spatiales ?

Nous avons supposé que les véhicules mesurés avaient gardé une vitesse suffisamment constante pour pouvoir passer de la signature temporelle à la signature spatiale en changeant uniquement leur échelle. Ainsi, on calcule le vecteur spatial (en mètre) en multipliant le vecteur temporel (en seconde) par la vitesse estimée v .

Pour obtenir les signatures spatiales à partir des signatures temporelles, nous avons commencé par estimer la vitesse de passage du véhicule. Cette estimation a été effectuée en calculant l'intercorrélation entre les signaux S1 et S2 mesurés par deux capteurs espacés d'une distance Δd le long de la direction de passage du véhicule, donc le long de l'axe longitudinal X :

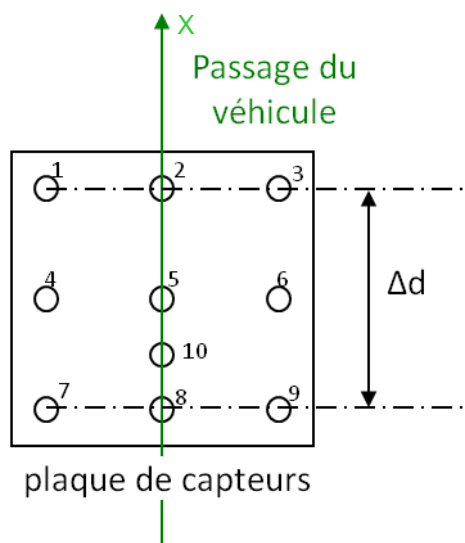


Figure 36 – Exemple de paire de capteurs (2 et 8) pouvant être utilisés pour estimer la vitesse de passage

L'intercorrélation correspond au produit scalaire entre S_1 , et S_2 décalé de τ . Ainsi, pour des signaux réels monodimensionnels :

$$C_{S_1S_2}(\tau) = \langle S_1(t) | S_2(t - \tau) \rangle = \int_{\mathbb{R}} S_1(t) \cdot S_2(t - \tau) dt \quad (16)$$

Le maximum d'intercorrélation est obtenu pour un certain retard Δt entre les signaux mesurés. La vitesse estimée vaut alors :

$$v = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (17)$$

L'obtention des signatures spatiales nécessite donc d'avoir au moins deux capteurs alignés sur l'axe X pour chaque site de mesure. Le dernier prétraitement des signatures spatiales consiste enfin à ré-échantillonner la signature de façon à avoir un point tous les cm.

Voyons à présent quels sont les différents moyens classiquement utilisés pour transformer des signaux avant de les comparer.

V.2.b Etat de l'art des transformations des signaux avant comparaison

Il est possible de conserver la totalité des signaux à comparer : on compare alors des données dites brutes, non transformées. L'avantage principal de cette représentation est que toute l'information contenue dans le signal est conservée. Par contre, cela nécessite de stocker puis traiter un grand volume de données, ce qui se traduit par un temps de calcul plus long. De plus, les données brutes conservent également le bruit mesuré par les capteurs. Il est souvent situé dans les hautes fréquences ou autour de fréquences précises (ex. 50Hz s'il y a présence de câbles électriques à proximité des capteurs), et l'on peut appliquer un filtre passe-bas pour le réduire.

Les données peuvent être transformées en restant ou non dans le domaine temporel. Dans tous les cas, le but de la transformation est de limiter la quantité de données à traiter, en réduisant le bruit mesuré, tout en conservant les caractéristiques uniques du signal à comparer. Le temps nécessaire pour transformer les données ne doit toutefois pas être rédhibitoire.

Une transformation très courante consiste à échantillonner le signal en ne gardant qu'un point sur n . Cette méthode a pour avantage de n'avoir qu'un seul paramètre à définir, permettant de réduire facilement et à volonté le nombre de points conservés. Cependant, pour ne pas perdre d'information haute fréquence, il faut respecter le théorème de Shannon qui relie la fréquence d'échantillonnage minimum F_{\min} à la fréquence maximale F_{\max} du signal : F_{\min} vaut au moins le double de F_{\max} .

Une seconde méthode de transformation consiste à ne garder que les points significatifs du signal, ou « PIP » (en anglais « Perceptually Important Points »). Il peut s'agir par exemple des extrema du signal (minima et maxima), ou de points sélectionnés itérativement : à chaque itération, on garde le point le plus éloigné des précédents points significatifs identifiés [FUT01, FUT08]. Cette méthode permet de réduire fortement la dimension des signaux à comparer, et à la différence de l'échantillonnage, les points ne sont pas gardés à cause de leur position temporelle dans le signal mais à cause du caractère particulier de leur amplitude. Sa mise en œuvre n'est toutefois pas aisée : il faut déterminer quels points garder, et combien en garder (voir [KWO09] pour un exemple sur des signatures magnétiques de véhicules).

En restant toujours dans le domaine temporel, une troisième transformation des données consiste à segmenter le signal en plusieurs segments de même taille. Chacun de ces segments est ensuite représenté par sa moyenne. Cette méthode est proche d'un échantillonnage, tout en déformant moins le signal : elle équivaut à un filtrage passe-bas du signal. Elle a par contre la même contrainte que l'échantillonnage, à savoir respecter le théorème de Shannon sous peine de perdre les variations haute fréquence. De plus, il faut définir le nombre et/ou la taille des segments.

Une autre méthode de transformation du signal reposant sur une segmentation consiste à rendre le signal linéaire par morceaux, par interpolation linéaire, ou par régression linéaire. Dans le cas de l'interpolation linéaire, on commence par diviser le signal en un grand nombre de segments linéaires, puis on réduit ce nombre par itérations successives, en fusionnant à chaque étape les deux segments adjacents dont la fusion est la moins coûteuse. Cela permet d'adapter la taille des segments au signal avec un algorithme simple. Dans le cas de la régression linéaire, une fois la segmentation du signal choisie, on calcule la droite qui représente le mieux chaque ensemble de points de chaque segment [HUN99, KEO01-2].

D'autres méthodes de transformation du signal passent par un changement de domaine du signal. Parmi les plus connues, citons la Transformée de Fourier Discrète qui permet de passer dans le domaine spectral, ainsi que la Transformée en Cosinus Discrète [DIN08] et la Transformée en Ondelettes Discrète, qui servent en particulier à comprimer le signal.

Dans le cas de données avec beaucoup de variables, notons également des transformations du signal issues de l'analyse de données, destinées à réduire ce nombre de variables en ne gardant que les plus significatives et en déformant donc le moins possible les mesures. Parmi les plus connues se trouve l'Analyse en Composantes Principales, au cours de laquelle de nouvelles variables décorréliées sont calculées à partir des variables initiales.

Dans le paragraphe suivant, nous allons présenter les distances que nous avons choisies pour comparer des paires de signatures magnétiques. Nous décrirons pour chacune les transformations appliquées avant comparaison.

V.2.c Calcul de distances entre signatures

Une fois la représentation des données choisie, plusieurs distances peuvent être utilisées pour mesurer la dissemblance entre deux signaux. Nous nous limitons ici aux mesures de dissemblance sur le signal entier ; il existe également des méthodes qui ne comparent que des parties de signaux entre elles. Trois types de distance ou de similitude ont été implémentés sur les signatures temporelles, et une sur les signatures spatiales.

V.2.c.1 Maximum d'intercorrélation entre signatures temporelles

Une première catégorie de distances ne s'applique qu'aux signaux de même taille. Les distances construites à partir de la fonction d'intercorrélation C_{S1S2} entre les deux signatures S1 et S2 en font partie [LIA05].

L'intercorrélation pour des signaux réels monodimensionnels a été décrite précédemment (équation (16)). Pour des signaux numériques réels de taille finie N obtenus après échantillonnage (ce qui est le cas de nos signatures magnétiques), l'intercorrélation est définie ainsi :

$$C_{S1S2}(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} S1(k) \cdot S2(k-n) = \begin{cases} \sum_{k=0}^{N-n-1} S1(k+n) \cdot S2(k), & n \geq 0 \\ C_{S2S1}(-n), & n < 0 \end{cases} \quad (18)$$

Plus les deux signaux sont proches, plus le maximum atteint par leur intercorrélacion sera grand. On notera également que deux signaux identiques de grande amplitude obtiendront un maximum d'intercorrélacion plus grand que deux signaux identiques de faible amplitude. Il est donc intéressant de normaliser l'intercorrélacion, pour s'affranchir de l'influence de l'amplitude des signaux.

L'intercorrélacion est donc une mesure de similitude, i.e. l'opposé d'une distance. [LIA05] propose par exemple la distance suivante entre deux signaux monodimensionnels de même taille N :

$$distCorr(S1, S2) = \sqrt{\frac{1 - (C_{S1S2}(0))^2}{\sum_{n=-N+1}^{N-1} (C_{S1S2}(n))^2}} \quad (19)$$

En premier lieu, nous avons donc choisi de calculer une similitude à partir du maximum d'intercorrélacion des signaux. Etant donné la rapidité d'exécution de l'algorithme par rapport à la distance DTW décrite dans le paragraphe suivant, nous nous permettons de représenter les signaux sous leur forme brute, sans transformation et donc sans aucune perte d'information. Les signatures temporelles comparées sont donc échantillonnées à la fréquence de nos capteurs : $F_e = 200\text{Hz}$.

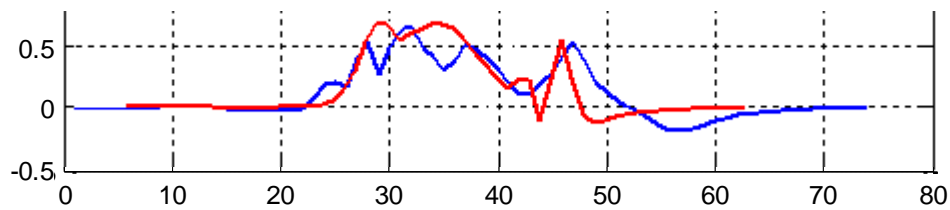
L'intercorrélacion ne se calcule que sur des signaux monodimensionnels. Nous obtenons donc trois mesures de similitude par ce procédé, une par axe des capteurs : $Corrx$, $Corry$, et $Corrz$.

Les signaux comparés doivent faire la même taille N. Si ce n'est pas le cas, le signal le plus court est complété par des zéros avant de calculer l'intercorrélacion. Une fois l'intercorrélacion calculée, nous l'avons normalisée en la divisant par la racine carrée du produit des énergies des signaux : ainsi, deux signaux peu similaires, mais de grande amplitude, n'obtiendront pas une distance plus faible que deux signaux très similaires, mais de faible amplitude. Puis, pour obtenir une mesure de similitude, nous n'avons conservé que le maximum de l'intercorrélacion normalisée. Voici par exemple l'expression de $Corrx$, où $S1_x$ représente la composante monodimensionnelle de S1 mesurée sur l'axe X :

$$Corrx(S1, S2) = \max_{n=-N+1}^{N-1} \left(\frac{C_{S1_x S2_x}(n)}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^N |S1_x(i)|^2 \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^N |S2_x(i)|^2 \right)}} \right) \quad (20)$$

Etant donné la nature de nos signatures temporelles, nous ne nous attendons pas à ce que cette mesure de similitude permette de détecter dans un grand nombre de cas si une paire de signatures provient ou non du même véhicule. En effet, les signatures temporelles sont déformées par la vitesse : deux signatures temporelles provenant d'un même véhicule mais mesurées à des vitesses différentes obtiendront peut-être un maximum d'intercorrélacion plus faible que deux signatures temporelles de véhicules différents mais mesurées à la même vitesse.

Signatures temporelles mesurées pour deux véhicules différents mais à la même vitesse



Signatures temporelles mesurées pour le même véhicule mais à des vitesses différentes

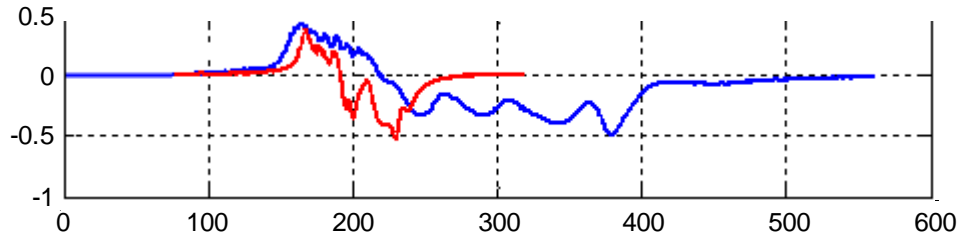


Figure 37 – Comparaison de deux signatures temporelles mesurées au passage de deux véhicules différents à la même vitesse et de deux signatures temporelles mesurées au passage du même véhicule à des vitesses différentes.

La figure ci-dessus illustre un cas où le maximum d'intercorrélation entre deux signatures temporelles de véhicules différents sera plus grand que le maximum d'intercorrélation entre deux signatures temporelles du même véhicule, à cause de la déformation due à la vitesse du véhicule.

V.2.c.2 Algorithme DTW entre signatures temporelles

Une deuxième catégorie de distances peut s'appliquer à des signaux de tailles différentes, et autorise la comparaison du i -ème point de S_1 avec tous ou aucun point de S_2 . La plus classique est la distance DTW (Dynamic Time Warping) [BER94, KEO01]. L'objectif de l'algorithme DTW, utilisé à l'origine dans la reconnaissance vocale, est d'aligner deux signaux en déformant l'axe de leurs abscisses :

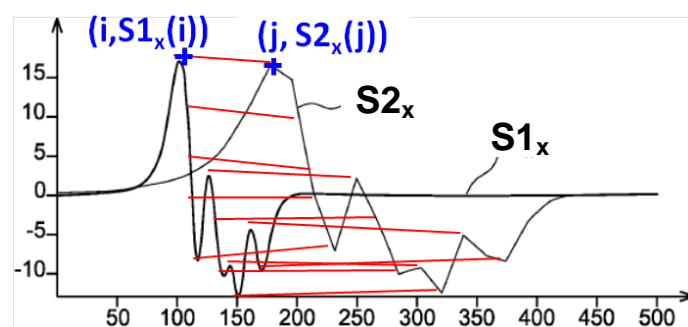


Figure 38 – Illustration de points proches identifiés par l'algorithme DTW, dans le cas de deux signaux monodimensionnels

La distance est ensuite calculée après cette déformation. Le principal inconvénient de cette méthode est l'important temps de calcul nécessaire pour aligner les signaux.

Le cœur de l'algorithme repose sur le calcul de la distance $D(i,j)$ entre chaque point i de S_1 , signal de longueur N_1 , et chaque point j de S_2 , signal de longueur N_2 . Dans notre étude, nous avons retenu

deux distances : une qui s'applique à des signatures monodimensionnelles (on en calcule donc trois : une pour l'axe X des signatures, une pour l'axe Y, et une pour l'axe Z), et une qui s'applique à des signatures tridimensionnelles.

$$\text{Monodimensionnelle (ex. pour l'axe X)} : D^2(i, j) = (S1_x(i) - S2_x(j))^2 \quad (21)$$

$$\text{Tridim.} : D^2(i, j) = \frac{(S1_x(i) - S2_x(j))^2 + (S1_y(i) - S2_y(j))^2 + (S1_z(i) - S2_z(j))^2}{3} \quad (22)$$

Les distances $D(i,j)$ entre paires de points forment une matrice des distances, de taille $N1 \times N2$. L'algorithme cherche ensuite le chemin optimal à travers cette matrice : c'est celui sur lequel la somme des distances $D(i,j)$ est minimale. Cette somme est appelée « distance DTW ». Le chemin optimal indique alors quel point i de $S1$ doit être relié avec quel point j de $S2$: il définit ainsi la déformation à appliquer à $S1$ pour l'aligner sur $S2$.

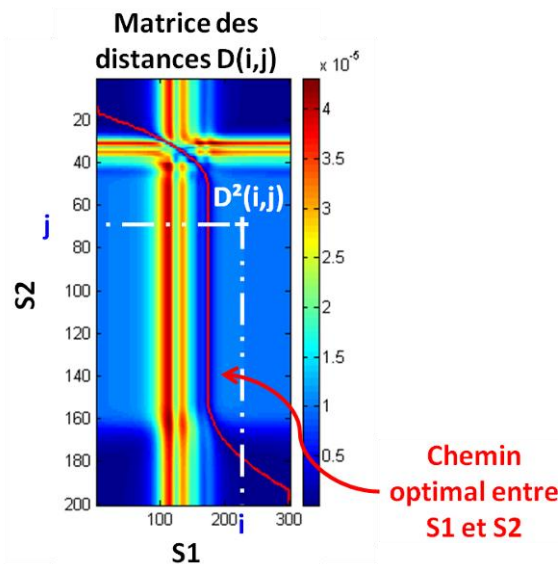


Figure 39 – Chemin optimal à travers la matrice des distances $D(i,j)$ entre $S1$ et $S2$

Nous divisons enfin la « distance DTW » par l'amplitude crête à crête maximale de $S1$ et de $S2$ afin de la normaliser. Nous obtenons ainsi quatre distances DTW : trois distances à partir de $D(i,j)$ monodimensionnel, et une distance à partir de $D(i,j)$ tridimensionnel. Elles sont respectivement notées : DTW_x , DTW_y , DTW_z , et DTW_{3D} .

Pour réduire le temps de calcul de la distance DTW – principal inconvénient de cette méthode, les signatures temporelles brutes, échantillonnées initialement à une fréquence de 200Hz, sont transformées : elles sont segmentées en segments de 10 échantillons chacun, puis chaque segment est ensuite représenté par sa moyenne, ce qui est équivalent à un filtrage passe-bas.

Pour limiter les chemins parcourus lors de la recherche du chemin optimal à travers la matrice des distances, les contraintes classiques [KEO01, LIA05] ont été implémentées :

- Fonction monotone : une fois que le point i du signal $S1$ a été relié au point j du signal $S2$, alors les points précédant i et j ne peuvent plus être parcourus,

- Continuité : le chemin optimal ne peut être composé que de points contigus : il n'est pas possible de passer de (i,j) à $(i+2,j)$ sans passer par $(i+1,j)$,
- Conditions aux limites : le 1^{er} et le dernier point du chemin optimal sont fixés.

L'algorithme DTW devrait être plus adapté à nos signatures temporelles : nous rappelons en effet qu'avant de calculer la distance entre deux signaux, il les déforme de façon à les aligner. Les performances d'un détecteur basé sur la distance DTW ne devraient donc pas être réduites même si les véhicules passent à des vitesses différentes. De plus, c'est la seule distance retenue qui permet de comparer des signaux de longueurs différentes, ce qui est le cas de nos signatures. Enfin, la distance *DTW3D* est tridimensionnelle et permettra donc de prendre en compte le lien entre les trois champs magnétiques mesurés sur les trois axes X, Y et Z du capteur.

Toutefois, la déformation des signaux peut jouer contre la ré-identification des véhicules : deux signatures ayant pratiquement la même forme à un pic près seront considérées comme très éloignées par l'algorithme DTW. Il peut en effet proposer des alignements contre-intuitifs avec un seul point de S1 relié à un grand nombre de points de S2 [KEO01].

V.2.c.3 Comparaison d'extrema (PIP) entre signatures temporelles

Nous avons enfin testé une méthode représentant les signatures temporelles par leurs points significatifs (ou PIP). Ne garder que les extrema du signal, i.e. ses maxima et ses minima, permet de s'affranchir de l'aspect temporel de la signature, et donc de la vitesse de passage du véhicule. La partie délicate de cette méthode est toutefois le choix des extrema à garder.

Nous avons décidé de ne garder qu'un nombre limité et constant d'extrema [CHA11]. Les extrema sont calculés à l'aide d'un algorithme développé par le GIPSA-lab pour extraire des tendances [CHA05].

L'algorithme décompose le signal sous forme de succession d'épisodes temporels, décrits par un symbole (croissant, décroissant, stable) et la valeur du signal aux extrémités des épisodes. On recherche ensuite les couples d'épisodes croissant/décroissant (respectivement décroissant/croissant). Un extremum correspond à la valeur finale du premier épisode.

Le nombre d'extrema que nous avons conservés pour chaque signature monodimensionnelle correspond au plus petit nombre d'extrema obtenus pour une signature, sur l'ensemble des signatures magnétiques mesurées, à savoir quatre extrema par signature monodimensionnelle. En effet, le nombre d'extrema peut varier d'une signature à l'autre. Pour implémenter les distances décrites ci-dessous, il est nécessaire d'avoir le même nombre de points pour chaque signature, ce qui explique ce choix du minimum et donc le faible nombre de points retenus par signature.

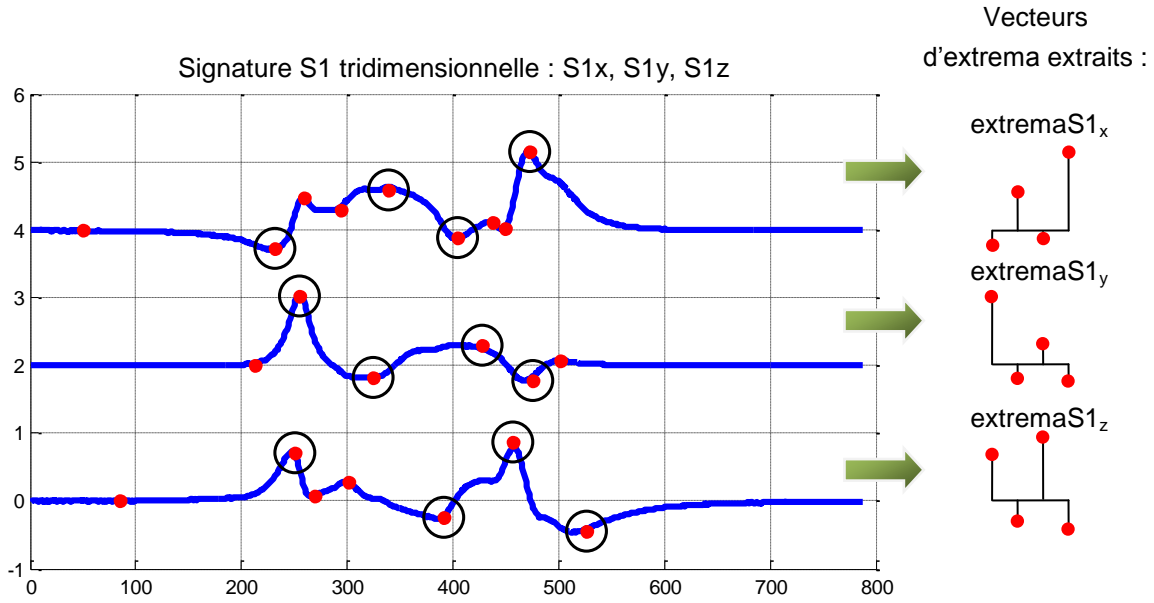


Figure 40 – Extrema (en rouge) extraits sur une signature tridimensionnelle (en bleu) suivant les axes X, Y et Z. Les extrema entourés correspondent aux deux plus grands maxima et deux plus petits minima de chaque axe.

Deux types de sélection d'extrema ont été expérimentés.

Le premier consiste à garder pour chaque axe X, Y et Z les deux plus grands maxima et les deux plus petits minima, soit 12 extrema en tout (ils sont entourés Figure 40). Les quatre extrema de chaque axe sont utilisés pour calculer une distance monodimensionnelle par axe, qui est définie comme la moyenne de la différence entre l'extrema sélectionné pour la signature S1 et l'extrema correspondant pour la signature S2, élevée au carré. On les note D_x , D_y et D_z . Exemple pour l'axe X, en notant extremaS1_x le vecteur, de longueur 4, des extrema de l'axe X de la signature S1 :

$$D_x^2(S1, S2) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 (\text{extremaS1}_x(i) - \text{extremaS2}_x(i))^2 \quad (23)$$

On calcule également une distance tridimensionnelle D_{3D}^2 (qui est la somme de D_x^2 , D_y^2 et D_z^2) à partir de ces 12 extrema, en notant extremaS1_k le vecteur, de longueur 4, des extrema de l'axe k de la signature S1 :

$$D_{3D}^2(S1, S2) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \sum_{k \in \{x, y, z\}} (\text{extremaS1}_k(i) - \text{extremaS2}_k(i))^2 \quad (24)$$

Le deuxième type de sélection d'extrema consiste à garder pour chaque axe X, Y et Z les quatre extrema dont la valeur absolue de la différence avec l'extremum suivant est la plus élevée (Figure 41). Cela correspond également à 12 extrema en tout, à partir desquels on calcule les mêmes distances mono- et tridimensionnelles que celles décrites ci-dessus. On les note D_{xb} , D_{yb} , D_{zb} , et D_{3Db} .

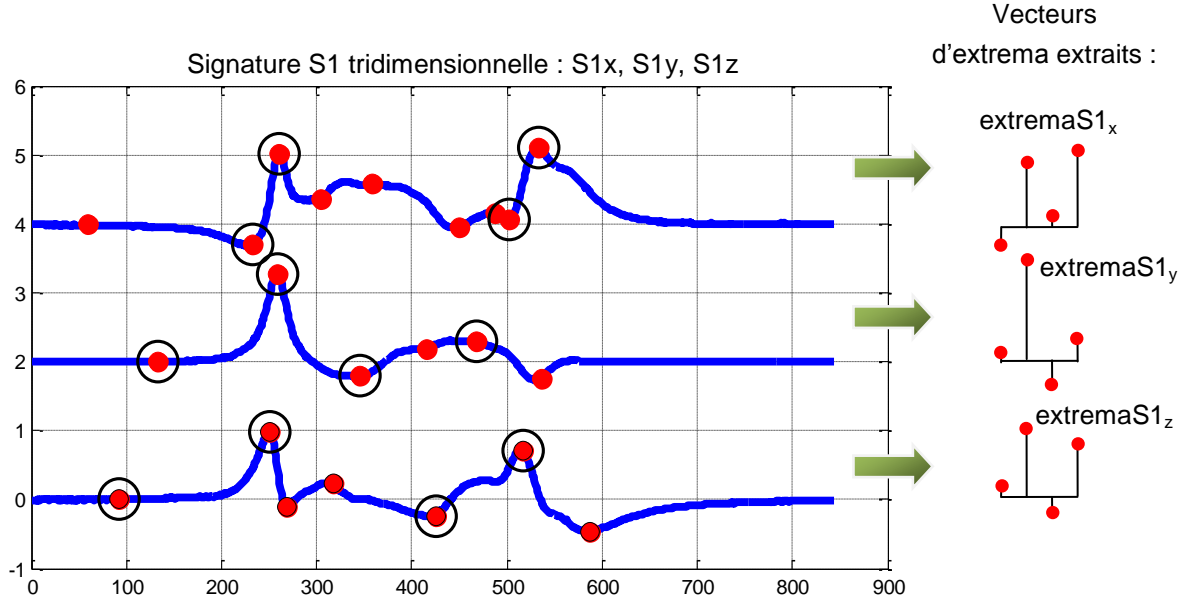


Figure 41 – Extrema extraits sur une signature tridimensionnelle suivant les axes X, Y et Z. Les extrema entourés correspondent aux quatre dont la valeur absolue de la différence avec l'extremum suivant est la plus élevée.

Une dernière distance tridimensionnelle est calculée en gardant 12 points de la signature magnétique 3D, soit 36 valeurs de champ magnétique. Pour ce faire, on associe à chacun des quatre extrema de chaque axe X, Y, Z, les valeurs de la signature magnétique sur les deux autres axes. Ainsi, si $\text{extremaS1}_x(1)$, le 1^{er} extrema de l'axe X de S1, correspond au j-ème point de S1, le 1^{er} des 12 points gardés aura pour coordonnées : $(S1_x(j) ; S1_y(j) ; S1_z(j))$, équivalent de $(\text{extremaS1}_x(1) ; S1_y(j) ; S1_z(j))$. Soit ptsS1_i le vecteur contenant les coordonnées sur l'axe i des 12 points gardés. La distance tridimensionnelle D_{3DM} est alors définie par :

$$D_{3DM}^2(S1, S2) = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} \sum_{k \in \{x, y, z\}} (\text{ptsS1}_k(i) - \text{ptsS2}_k(i))^2 \quad (25)$$

Nous noterons qu'un des principaux inconvénients de cette méthode est la difficulté à choisir les extrema à garder, à la fois en termes de qualité et de quantité.

V.2.c.4 Distance euclidienne entre signatures spatiales

La distance euclidienne est la plus classique des distances qui ne s'appliquent qu'aux signaux de même taille, et comparent le i-ème point du 1^{er} signal, S1, avec le i-ème point du 2^{ème} signal, S2. Elle est bien connue depuis des dizaines d'années, est simple à mettre en œuvre, et ne nécessite pas de paramétrage, donc pas d'optimisation de paramètres [KEO02] :

$$\text{distEucl}(S1, S2) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (S1(i) - S2(i))^2} \quad (26)$$

pour S1 et S2 deux signaux monodimensionnels de taille N

La distance de Minkowski généralise la distance euclidienne à tout ordre q [LIA05] :

$$distMink_q(S1, S2) = \sqrt[q]{\sum_{i=1}^N (S1(i) - S2(i))^q} \quad (27)$$

Lorsque q tend vers l'infini, on atteint la distance de Tchebychev, ou distance sup :

$$distTche(S1, S2) = \lim_{q \rightarrow \infty} (distMink_q(S1, S2)) = \max_{i=1}^N (|S1(i) - S2(i)|) \quad (28)$$

Pour tenir compte de l'amplitude des données manipulées, la distance euclidienne peut être pondérée. L'exemple suivant est la distance du χ^2 , qui ne s'applique qu'à des données strictement positives ($S1(i) > 0$). Cette normalisation ne pourra donc pas être appliquée aux signatures magnétiques qui comportent régulièrement des points nuls, et peuvent être négatives comme positives.

$$distKhi(S1, S2) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(S1(i) - S2(i))^2}{S1(i)}} \quad (29)$$

Dans cette même catégorie de distances, citons les distances construites à partir de ccP, le coefficient de corrélation de Pearson [LIA05, GOL98]. Celui-ci permet de mesurer la corrélation linéaire entre deux signaux de même taille, et prend des valeurs réelles entre -1 et +1. Les distances sont alors définies de façon à ce qu'elles valent 0 lorsque ccP vaut 1, et qu'elles augmentent au fur et à mesure que ccP se rapproche de -1.

La distance euclidienne, très classique, a donc été testée sur les signatures spatiales. Comme elle s'applique à des signaux de même taille, des prétraitements complémentaires sont appliqués aux paires de signatures spatiales à comparer.

Tout d'abord, on doit aligner autant que possible les deux signatures spatiales S1 et S2 l'une par rapport à l'autre. Cette étape est nécessaire, car si l'on calcule la distance euclidienne entre une signature S1 et cette même signature S1 décalée ne serait-ce que d'un cm sur l'échelle spatiale, on obtiendra une distance non nulle.

Cet alignement est réalisé en calculant une intercorrélacion normalisée entre chaque axe de S1 et S2 (une intercorrélacion normalisée a été présentée à l'équation (20)). Le maximum d'intercorrélacion de chaque axe donne un décalage spatial ΔdX , ΔdY ou ΔdZ à appliquer pour aligner les deux signaux.

Nous avons mené une étude sur notre base de données de mars 2012, pour déterminer quels axes (X, Y et/ou Z) permettaient d'aligner au mieux les signatures, et donc d'obtenir les meilleurs résultats de ré-identification. Plusieurs cas ont été testés : prise en compte des 3 axes, de 2 axes seulement, d'un seul axe, prise en compte de l'axe obtenant l'intercorrélacion la plus pointue autour de son maximum, prise en compte de l'axe obtenant le plus grand maximum d'intercorrélacion, prise en compte de l'axe obtenant un décalage Δd minimum, puis de l'axe obtenant le décalage médian. Au final, les meilleurs résultats ont été obtenus avec l'axe X seul : le même décalage ΔdX a donc été appliqué aux trois axes X, Y, Z.

Dans un 2^{ème} temps, si les signatures alignées ne sont pas de la même taille et ne se recouvrent pas entièrement, on complète les points manquants par des valeurs nulles. S1 et S2 ont alors la même longueur N et l'on peut calculer leur distance euclidienne.

Nous avons testé plusieurs distances définies à partir de distances euclidiennes : trois monodimensionnelles (une par axe), trois bidimensionnelles (XY, XZ, YZ), et une tridimensionnelle. Toutes ont été divisées par la longueur N identique aux deux signatures, afin d'obtenir une distance moyennée sur le nombre de points : ainsi, deux signaux peu similaires, mais de longueur faible, n'obtiendront pas une distance plus faible que deux signaux très similaires, mais de grande longueur. Nous n'avons par contre pas eu besoin de normaliser la distance par rapport à l'amplitude des signaux.

Exemple de distance monodimensionnelle moyennée sur N (axe X) :

$$distX = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \sqrt{(S1_x(i) - S2_x(i))^2} \quad (30)$$

Exemple de distance euclidienne bidimensionnelle moyennée sur N (axes X et Y) :

$$distXY = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \sqrt{((S1_x(i) - S2_x(i))^2 + (S1_y(i) - S2_y(i))^2)} \quad (31)$$

Distance tridimensionnelle moyennée sur N (axes X, Y et Z) :

$$distXYZ = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \sqrt{((S1_x(i) - S2_x(i))^2 + (S1_y(i) - S2_y(i))^2 + (S1_z(i) - S2_z(i))^2)} \quad (32)$$

L'avantage principal de la distance euclidienne réside dans son calcul rapide et sans paramètre à optimiser. Cependant, dans notre application, cette méthode nécessite au préalable d'avoir transformé les signatures temporelles en signatures spatiales, ce qui entraîne l'installation de deux capteurs minimum par point de mesure, et nécessite également d'aligner les signatures avant de les comparer.

V.3 Méthode d'évaluation des performances

Après avoir choisi les différentes distances avec lesquelles nous avons comparé des paires de signatures magnétiques, nous nous sommes appuyés sur des méthodes d'évaluation de détecteurs pour étudier leurs performances.

V.3.a Histogrammes des distances et seuil de détection

Nos bases de données de signatures magnétiques nous permettent de manipuler des paires de signatures provenant ou non du même véhicule. De façon logique, la population des paires de signatures venant de véhicules différents est beaucoup plus grande que celle des paires de signatures venant du même véhicule. Nos bases de données possèdent donc deux classes déséquilibrées : « paires de signatures venant du même véhicule » (appelée par la suite la Classe « même ») et « paires de signatures venant de véhicules différents » (appelée par la suite la Classe « différents »). Par exemple, si l'on construit des paires de signatures à partir des signatures

mesurées en janvier 2011 pour les véhicules roulant vers le Nord, on obtiendra 92 paires de signatures provenant du même véhicule, et 2053 paires provenant de véhicules différents.

Nous rappelons que le principe du détecteur dont nous nous servons pour ré-identifier un véhicule est le suivant : si la distance entre deux signatures est inférieure à un certain seuil T_{dist} , alors on détecte qu'elles proviennent d'un même véhicule (Classe « même ») ; dans le cas contraire, on détecte qu'elles proviennent de deux véhicules différents (Classe « différents »). Les signatures identifiées comme appartenant à la Classe « même » peuvent venir ou non du même véhicule. De même, les signatures de la Classe « différents » peuvent venir ou non de véhicules différents.

Pour n'obtenir aucune erreur d'identification, il faut qu'il existe effectivement un seuil en-dessous duquel se trouvent toutes les distances de la Classe « même », et au-dessus duquel se trouvent toutes les distances de la Classe « différents ». La figure suivante illustre ce cas favorable à la ré-identification :

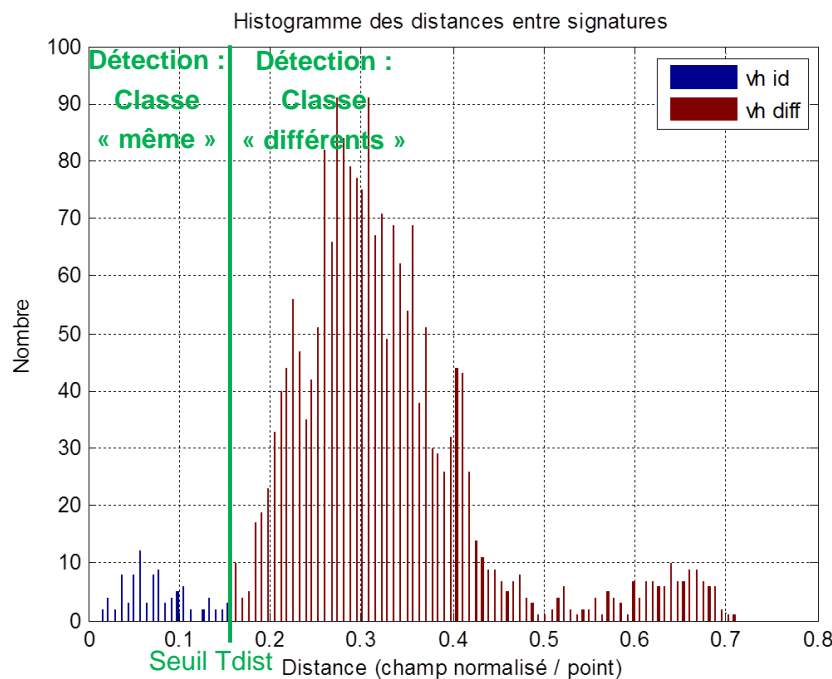


Figure 42 – Histogramme des distances entre paires de signatures : en bleu, les distances obtenues pour les paires de signatures venant d'un même véhicule, et en rouge, les distances obtenues pour les paires de signatures venant de véhicules différents.

Cet histogramme des distances permet aussi de visualiser le déséquilibre entre le nombre de paires de signatures appartenant à chaque classe.

A présent, si la plus faible distance entre deux signatures de la Classe « différents » est plus petite que la plus grande distance entre deux signatures de la Classe « même », aucun seuil ne permettra d'avoir aucune erreur d'identification. Les deux figures suivantes illustrent ce cas défavorable à la ré-identification.

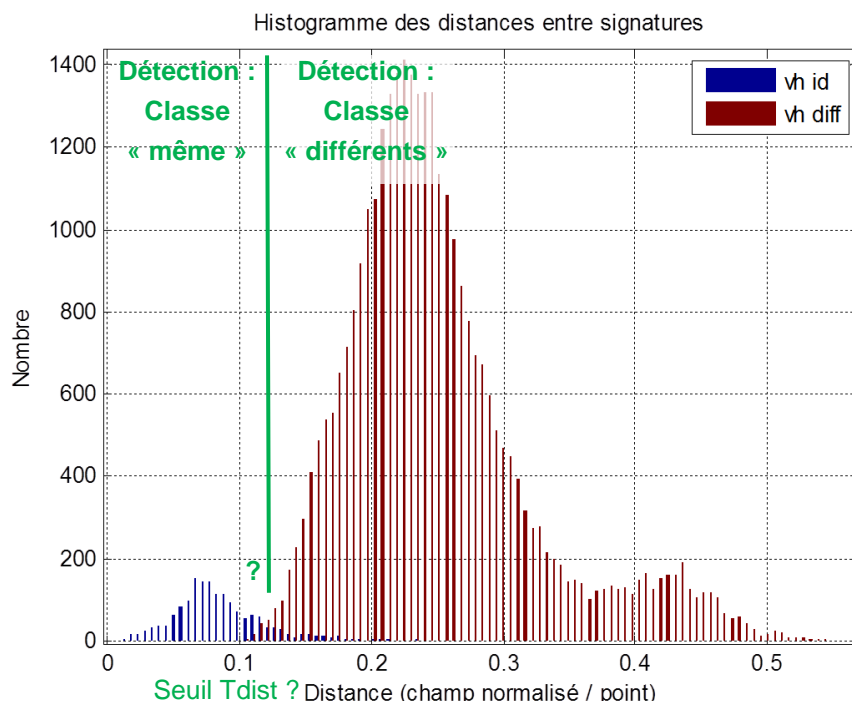


Figure 43 – Histogramme des distances entre paires de signatures : les courbes des deux classes s’entremêlent.

Dans la figure ci-dessous (Figure 44), deux seuils extrêmes ont été représentés :

- Seuil Tdist1 : c’est le seuil maximum que l’on peut choisir pour ne détecter dans la Classe « même » que des paires de signatures provenant effectivement du même véhicule (ce sont les **bonnes détections**). Tout seuil plus grand que Tdist1 détectera des **fausses alarmes**, i.e. détectera dans la Classe « même » des signatures provenant de véhicules différents. Toutefois, avec ce seuil, certaines paires de signatures provenant d’un même véhicule seront classées dans la Classe « différents » car elles ont une distance supérieure à Tdist1. Ce seuil Tdist1 détermine le taux de bonnes détections maximal associé à 0% de fausses alarmes.
- Seuil Tdist2 : c’est le seuil minimum que l’on peut choisir pour détecter dans la Classe « même » toutes les signatures provenant effectivement du même véhicule, i.e. pour avoir un pourcentage de **bonnes détections** de 100%. Tout seuil plus petit que Tdist2 passera à côté de certaines paires de signatures venant du même véhicule, les détectant comme venant de deux véhicules différents. Toutefois, avec ce seuil, de nombreuses paires de signatures provenant de véhicules différents seront classées dans la Classe « même », i.e. seront de **fausses alarmes**, car elles ont une distance inférieure à Tdist2. Ce seuil Tdist2 détermine le taux de fausses alarmes minimum pour 100% de bonnes détections.

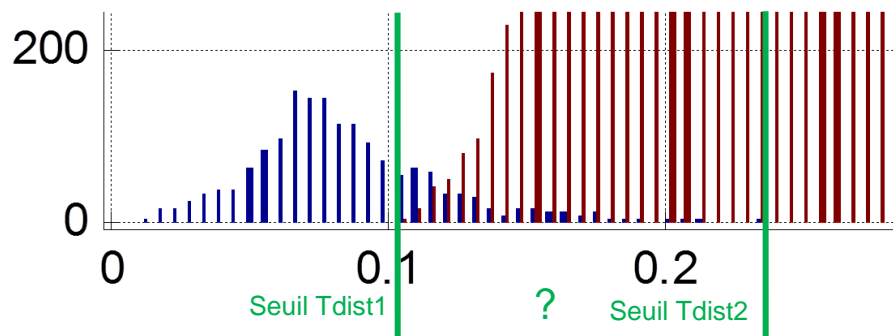


Figure 44 – Zoom sur la figure précédente.

Le seuil acceptable sera situé entre Tdist1 et Tdist2, de façon à avoir un compromis entre le pourcentage de signatures bien détectées comme venant du même véhicule (pourcentage de bonnes détections), et le pourcentage de fausses alarmes.

V.3.b Courbes de détection

Nous cherchons à évaluer la capacité de l'algorithme à séparer correctement les Classes « même » et « différents ». Afin de définir les critères de performance, la figure ci-dessous présente une matrice de concordance qui résume les quatre cas pouvant être rencontrés en sortie du détecteur. Elle introduit également les rapports BD, FA et PE qui vont être définis ci-après :

Réalité \ Décision du Détecteur	(S1,S2) proviennent du même véhicule	(S1,S2) proviennent de deux véhicules différents
(S1,S2) appartiennent à la Classe « même »	a	b
(S1,S2) appartiennent à la Classe « différents »	c	d

$BD = a/(a+c)$
 $FA = b/(b+d)$
 $PE = b/(b+a)$

Figure 45 – Matrice de concordance d'une fonction de décision, et visualisation du calcul de BD, de PE, et de FA par rapport aux valeurs de la matrice de concordance.

Dans ce tableau, a, b, c et d représentent un nombre de paires de signatures.

Les sommes a+c et b+d ne varient pas en fonction du seuil Tdist choisi : elles ne dépendent que de la base de données des signatures qui est traitée par l'algorithme.

Les sommes a+b et c+d sont par contre obtenues pour un seuil Tdist fixé : elles dépendent des performances de ré-identification de l'algorithme.

Le pourcentage de bonnes détections, BD, est défini comme le pourcentage de paires de signatures provenant du même véhicule qui sont correctement détectées comme venant du même véhicule :

$$BD = \frac{a}{(a + c)} \quad (33)$$

BD correspond au taux de ré-identification tel que défini au II.2.b, en supposant que tous les véhicules ré-identifiés en Figure 2 ont été correctement appariés.

Le pourcentage de fausses alarmes, FA, est défini comme le pourcentage de paires de signatures provenant de véhicules différents qui sont faussement détectées comme venant du même véhicule :

$$FA = \frac{b}{(b + d)} \quad (34)$$

Comment mesurer à présent la probabilité que l'algorithme se trompe lorsqu'il reconnaît que deux véhicules sont identiques, et donc comment mesurer la confiance que l'on peut avoir dans le détecteur ? Le « pourcentage d'erreurs », ou PE, va comptabiliser le nombre de fois où l'algorithme a reconnu deux véhicules identiques alors qu'ils étaient différents, par rapport à l'ensemble des fois où il a reconnu deux véhicules identiques :

$$PE = \frac{b}{(a + b)} \quad (35)$$

Dans une application de ré-identification pour estimer des paramètres de trafic (temps de parcours et matrices origine-destination), il faut que l'on puisse avoir une grande confiance dans la reconnaissance des paires de signatures provenant d'un même véhicule. En effet, le calcul des paramètres de trafic ne sera effectué que sur les paires de signatures reconnues comme identiques, donc sur $a+b$ paires de signatures. Ce qui nous intéresse, c'est d'avoir a très grand devant b , car tout erreur b faussera les estimations des paramètres : on ne peut donc autoriser qu'un très faible pourcentage d'erreur PE.

Il est ensuite souhaitable d'avoir un grand pourcentage de bonnes détections BD : ainsi, la majorité des véhicules passant au-dessus des capteurs pourra servir à estimer les paramètres de trafic, et les paramètres pourront donc être plus souvent actualisés. Un bon algorithme de ré-identification de véhicules pour estimer des paramètres de trafic de façon dynamique devra donc atteindre le plus grand BD possible en n'autorisant qu'un faible pourcentage d'erreur PE. Au paragraphe II.2.b, nous avons cité deux références, qui ne précisaient pas quel PE était acceptable. La première indiquait qu'un BD de 50% était suffisant [CER08], et la seconde proposait une formule pour exprimer un BD minimum en fonction du débit de véhicules et de la fréquence d'actualisation voulue pour les paramètres [KAV10]. Nous nous plaçons plutôt dans le second modèle : nous souhaitons atteindre le plus grand BD possible, de façon à ce que la fréquence d'actualisation puisse rester élevée, même si le débit des véhicules est très faible, ce qui est le cas lors de congestions de trafic.

En faisant varier le seuil du détecteur, on construit des courbes de détection qui permettent d'évaluer ses performances : chaque point de la courbe est construit pour une valeur de seuil donnée. Une courbe de détection classique est la courbe COR (Caractéristique Opérationnelle de Réception), qui exprime BD en fonction de FA [MAD99]. Nous avons également construit la courbe de détection BD en fonction de PE (appelée par la suite courbe BD-PE) :

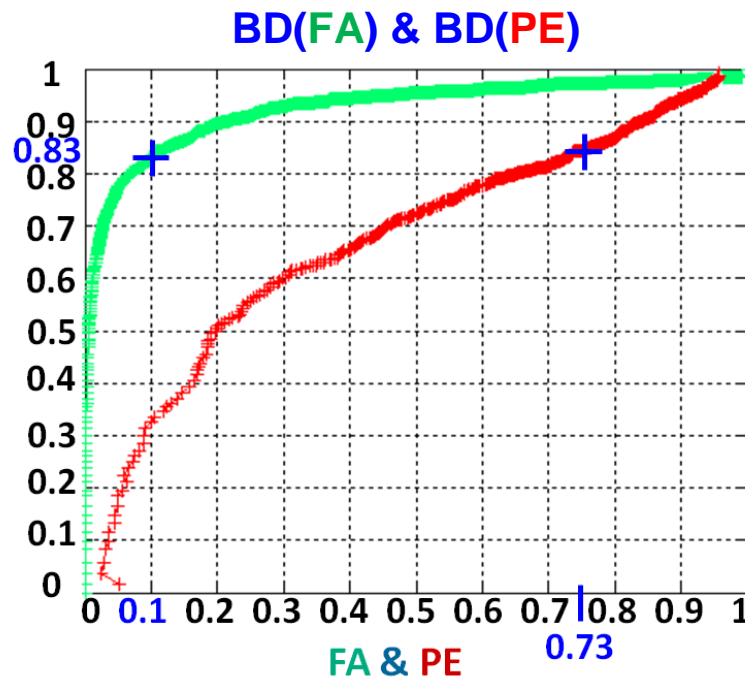


Figure 46 – Cas de classes déséquilibrées : Comparaison de la courbe COR (ou BD(FA)) avec la courbe BD-PE (BD en fonction de PE) construites à partir des mêmes valeurs a , b , c et d de la matrice de concordance.

Dans cet exemple, intéressons-nous aux valeurs de a , b , c , et d correspondant aux croix bleues indiquées sur la figure ci-dessus :

Réalité \ Décision du Détecteur	(S1,S2) proviennent du même véhicule $a + c = 92$	(S1,S2) proviennent de deux véhicules différents $b + d = 2053$
(S1,S2) appartiennent à la Classe « même » : $a + b = 281$	$a = 76$	$b = 205$
(S1,S2) appartiennent à la Classe « différents » : $c + d = 1864$	$c = 16$	$d = 1848$

Tableau 3 – Matrice de concordance d'une fonction de décision – Exemple de résultat obtenu pour un seuil T_{dist} fixé

Un total de 92 paires de signatures provenait d'un même véhicule. Parmi elles, 76 ont été bien ré-identifiées : le taux de bonnes détections BD vaut donc 83%. Cela quantifie la probabilité que l'algorithme détecte bien toutes les paires de signatures provenant du même véhicule : avec ce seuil T_{dist} , peu de paires de signatures venant d'un même véhicule ne seront pas détectées.

Un total de 2053 paires de signatures provenait de véhicules différents. Parmi elles, 205 ont été faussement ré-identifiées comme provenant d'un même véhicule : le taux de Fausse Alarme FA vaut donc 10%. Cela peut paraître peu. Toutefois, calculons à présent le Pourcentage d'Erreurs PE.

Un total de 281 paires de signatures a été ré-identifié, donc détecté comme provenant du même véhicule. Parmi elles, 76 provenaient effectivement du même véhicule, mais 205 venaient de véhicules différents : le Pourcentage d'Erreurs PE vaut donc 73%, ce qui est très élevé pour une

application de ré-identification. En effet, nous ne pouvons pas avoir confiance lorsque l'algorithme nous indique avoir ré-identifié un véhicule : il y a 73% de chance pour qu'il ait fait une erreur.

L'algorithme a donc reconnu un faible pourcentage de paires de véhicules différents comme étant identiques (10% des 2053 paires), mais rapporté au nombre total de paires de signatures reconnues comme identiques, cela correspond à une très grande erreur de ré-identification (73% des 281 paires ré-identifiées).

Etant donné la définition d'un bon algorithme de ré-identification en vue d'estimer des paramètres de trafic (atteindre le plus grand BD possible en n'autorisant qu'un faible pourcentage d'erreur PE), nous avons donc préféré construire la courbe de détection BD en fonction de PE, plutôt que la courbe de BD en fonction de FA, pour comparer les performances des différents algorithmes de ré-identification.

V.4 Résultats

Cette partie décrit les performances obtenues par les différentes méthodes de ré-identification testées sur les données expérimentales de janvier 2011 et mars 2012. Les méthodes sont dans un premier temps comparées entre elles, en utilisant les signatures de véhicules circulant toujours suivant la même orientation (V.4.a). Ensuite, la meilleure méthode est sélectionnée et ses performances en ré-identification sont évaluées dans le cas de véhicules ayant changé d'orientation (V.4.b) ou ayant accéléré (V.4.c). Finalement, l'impact d'un décalage latéral du véhicule par rapport au capteur est analysé (V.4.d) [CHA12, PIT12].

V.4.a Comparaison de toutes les méthodes choisies

Nous comparons tout d'abord les performances obtenues par l'ensemble des familles de méthodes choisies : le maximum d'intercorrélation, l'algorithme DTW, la comparaison d'extrema, et la distance euclidienne.

Cette comparaison a été effectuée sur les signatures magnétiques mesurées en janvier 2011 par le capteur central de la plaque de capteurs, pour tous les véhicules roulant du Nord vers le Sud. Nous rappelons que 25 véhicules ont roulé pendant nos expérimentations de janvier 2011, avec en moyenne trois passages au-dessus des capteurs magnétiques pour un véhicule et une orientation donnée. La base de données se compose de 92 paires de signatures provenant d'un même véhicule (Classe « même ») parmi les 2145 paires de signatures possibles. Il y a donc 2053 paires de signatures provenant de deux véhicules différents (Classe « différents »). Cette base a bien un déséquilibre entre les populations de ses deux classes.

Par ailleurs, nous rappelons que les véhicules étaient très contraints par la largeur de la plaque de capteurs. Nous pouvons donc considérer que leur position latérale n'a pas varié entre deux passages.

Voici les courbes de détection BD-PE obtenues par le maximum d'intercorrélation des axes X, Y, et Z (défini équation (20)) :

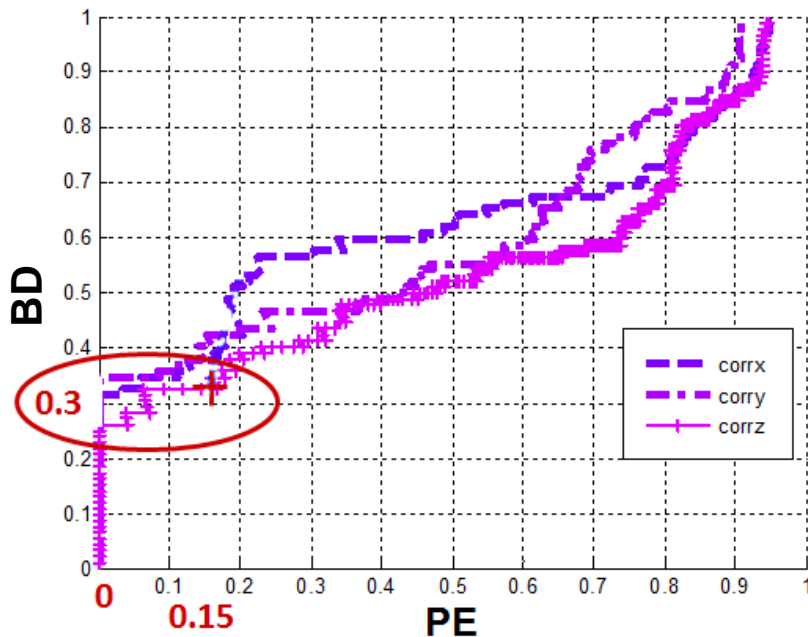


Figure 47 – Courbe BD-PE des méthodes « maximum d'intercorrélation » axes X, Y et Z

Ces trois méthodes atteignent de faibles performances. Si l'on souhaite avoir une confiance totale dans les ré-identifications proposées par l'algorithme, et donc si l'on autorise un Pourcentage d'Erreur PE nul, Corrx et Corry n'obtiennent un taux de bonnes détections BD que de 30 à 35%. Seules 30% à 35% des paires de signatures provenant d'un même véhicule ont donc été reconnues comme telles.

En autorisant 15% de PE (donc en autorisant que parmi les paires de signatures reconnues comme identiques par le détecteur, 15% proviennent en fait de véhicules différents), les taux BD n'augmentent que de 10%, pour atteindre environ 40% de bonnes détections.

D'un point de vue des histogrammes des distances, cela signifie que les distances de la Classe « même » et les distances de la Classe « différent » calculées avec Corrx, Corry et Corrz se chevauchent : il n'est pas possible de trouver un seuil Tdist en-dessous duquel on trouve toutes les distances de la Classe « même », et au-dessus duquel on trouve toutes les distances de la Classe « différent ».

Dans le 1^{er} cas où PE = 0, le seuil Tdist est tellement faible que seules 30 à 35% des distances de la Classe « même » lui sont inférieures. Dans le 2^{ème} cas où PE = 15%, le seuil Tdist est plus élevé, et on a à présent 40% des distances de la Classe « même » qui lui sont inférieures. Le problème est que 15% des distances de la Classe « différent » sont également inférieures à ce seuil, et génèrent donc des erreurs de ré-identification.

Neuf déclinaisons de la méthode de comparaison d'extrema ont ensuite été testées (se référer aux équations (23) à (25)). La figure suivante (Figure 48) présente les courbes de détection BD-PE des distances D_x , D_{xb} , D_y , D_{yb} , D_z , D_{zb} , D_{3D} , D_{3Db} , et D_{3DM} .

Cette figure montre que les performances obtenues par les comparaisons d'extrema sont similaires à celle du maximum d'intercorrélation. Parmi les neuf essais, la distance qui obtient les meilleurs résultats est la D_{3D} : avec 0% d'erreur, elle atteint 43% de bonnes détections. Si l'on autorise 5% d'erreurs, BD vaut alors 50%, et avec un PE de 15%, BD atteint environ 60%.

Les deux premières méthodes étudiées, à savoir le maximum d'intercorrélation et la comparaison d'extrema, obtiennent donc des résultats très médiocres, et insuffisants pour une application de ré-identification de véhicules.

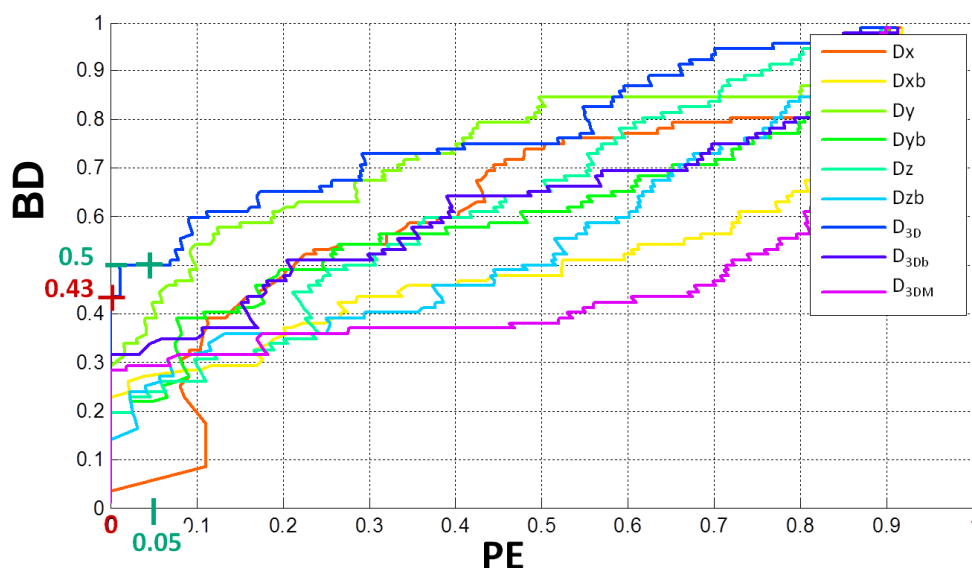


Figure 48 – Courbe BD-PE des méthodes de comparaison d'extrema

La figure suivante présente les résultats obtenus par les 4 méthodes s'appuyant sur des distances DTW (se référer aux équations (21) et (22)) : une distance DTW monodimensionnelle par axe X, Y et Z, et une distance DTW tridimensionnelle.

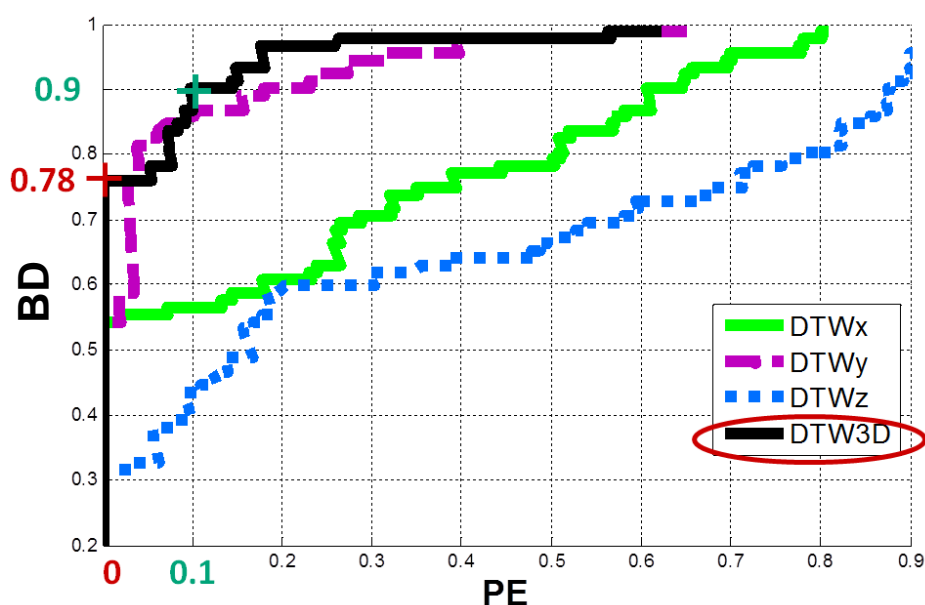


Figure 49 – Courbe BD-PE des méthodes DTW axes X, Y et Z, et DTW 3D

Les performances sont meilleures que celles atteintes par le maximum d'intercorrélation et la comparaison d'extrema. Parmi les distances DTW, les meilleurs résultats sont obtenus par la distance *DTW3D*, qui est capable de détecter 78% des paires de signatures provenant d'un même véhicule

sans faire une seule erreur. La meilleure des distances DTW monodimensionnelles, DTW_y , en détecte au mieux 50% sans erreur. En autorisant un PE de 10%, le taux de bonnes détections de DTW_{3D} peut atteindre les 90%.

Les sept distances euclidiennes testées (une distance tridimensionnelle XYZ, trois distances bidimensionnelles XY, XZ, et YZ, et trois distances monodimensionnelles X, Y, et Z) ont été définies précédemment aux équations (30) à (32).

Voici les performances qu'elles ont obtenues :

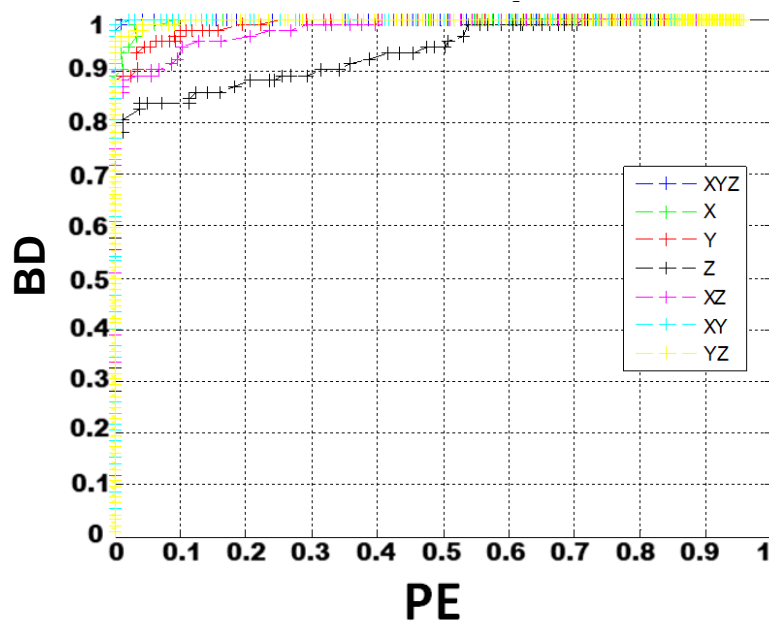


Figure 50 – Courbe BD-PE des distances euclidiennes tridimensionnelle, monodimensionnelles, et bidimensionnelles – Signatures de même orientation Nord vers Sud

Les performances des distances euclidiennes sont globalement très bonnes, avec un taux de bonnes détections allant jusqu'à 99% sans erreur. Pour faciliter leur lecture, la figure suivante représente un agrandissement de la courbe BD-PE :

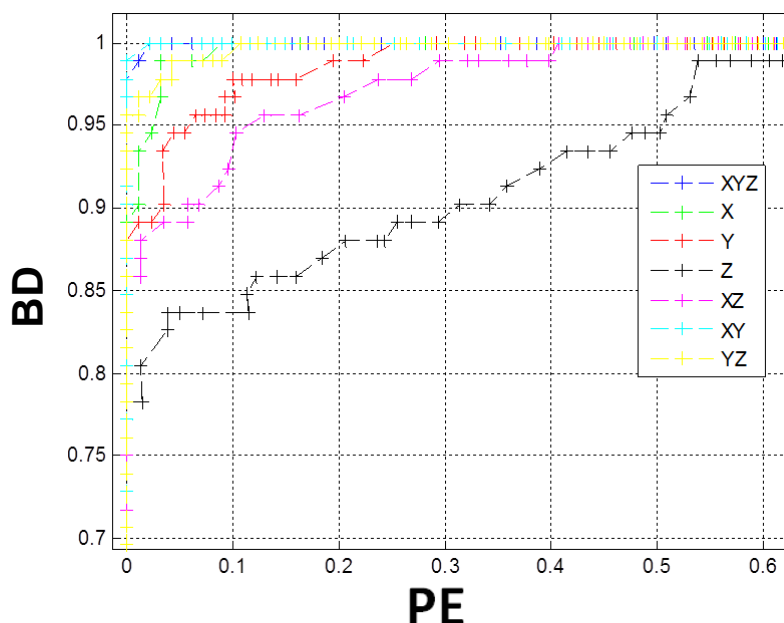


Figure 51 – Zoom sur la courbe BD-PE des distances euclidiennes – Signatures de même orientation Nord vers Sud

Comme pour la distance DTW, les meilleurs résultats sont obtenus avec la distance euclidienne tridimensionnelle (suivie de la distance bidimensionnelle XY). Avec cette méthode, augmenter le pourcentage d'erreurs jusqu'à 10 ou 15% ne permet pas d'avoir un meilleur pourcentage de bonnes détections.

Les performances de ré-identification sont donc meilleures lorsque l'on tient compte des trois axes magnétiques de la signature : cela montre que les variations du signal magnétique sur les trois axes sont liées.

Le tableau suivant récapitule les taux de bonnes détections des méthodes comparées, pour un pourcentage d'erreur PE nul et pour un PE de 10% :

Méthode	BD (PE) PE = 0%	BD (PE) PE = 10%
Maximum d'intercorrélation (meilleure : Corry)	35%	37%
Comparaison d'extrema (meilleure : D3D)	43%	60%
DTW (meilleure : DTW3D)	78%	90%
Distance euclidienne (meilleure : distXYZ)	99%	100%

Tableau 4 – Taux de bonnes détections obtenus par les méthodes de ré-identification comparées – Résultats sur les signatures de même orientation Nord vers Sud de janvier 2011

Malgré sa simplicité, la distance euclidienne se distingue parmi les méthodes testées sur la base de données des signatures magnétiques de même orientation Nord vers Sud enregistrées en janvier 2011. Seule la méthode DTW obtient des résultats approchants, en particulier si l'on autorise 10%

d'erreurs dans l'identification de paires de signatures provenant du même véhicule ; cependant, l'algorithme DTW est bien plus coûteux en temps que le calcul de la distance euclidienne.

Dans la suite de ce chapitre, seuls les résultats obtenus par la méthode de la distance euclidienne tridimensionnelle seront présentés – sauf pour étudier l'influence de l'accélération du véhicule sur les résultats. Dans ce dernier cas, on comparera la méthode DTW 3D, qui est capable de gérer les déformations du signal temporel dues à l'accélération du véhicule, et la méthode distance euclidienne distXYZ, dont le bon fonctionnement repose sur la bonne obtention de la signature spatiale du véhicule.

V.4.b Influence de l'orientation du véhicule

Les premiers résultats présentés ont été obtenus dans le cas le plus favorable où tous les véhicules roulaient avec la même orientation par rapport au champ magnétique terrestre (Nord vers Sud). Rappelons que la signature magnétique d'un véhicule B_{vh} (§ III.2) est générée par son aimantation permanente M_{perm} , favorable à la ré-identification, et son aimantation induite M_{ind} , qui dépend du champ magnétique terrestre B_{Ter} :

$$\vec{B}_{vh} = \vec{B}_{perm} + \vec{B}_{ind} = \vec{B}(\vec{M}_{perm}) + \vec{B}(\vec{M}_{ind}(\vec{B}_{Ter})) \quad (36)$$

Evaluer la part de la signature magnétique (mesurée depuis le sol) qui varie en fonction de l'orientation par rapport à B_{Ter} n'a à notre connaissance pas été étudié de façon détaillée. Toutefois, d'après [CHE07], étant donné que l'angle entre le champ magnétique terrestre et le plan horizontal vaut 65° à nos latitudes, ils s'attendent à ce que la signature varie peu en fonction de l'orientation du véhicule.

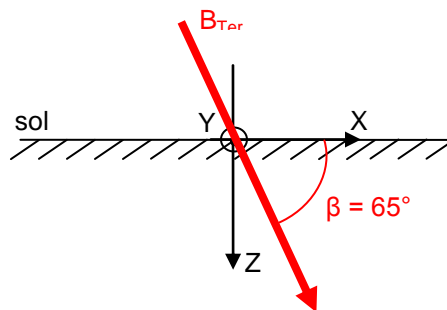


Figure 52 – Inclinaison d'angle β du champ magnétique terrestre par rapport au plan horizontal à nos latitudes

Si le champ magnétique terrestre était uniquement vertical (angle de 90°), alors le champ magnétique externe au véhicule ne varierait pas lorsque le véhicule change d'orientation dans le plan horizontal. L'aimantation induite par le champ terrestre sur X, Y et Z ne varierait donc pas non plus, ni par conséquent la signature du véhicule. Dans le cas d'un angle de 65° , la projection du champ terrestre sur l'axe vertical est deux fois plus importante que celle sur le plan horizontal. Le champ magnétique externe au véhicule va donc peu varier lorsque le véhicule va changer d'orientation, et par conséquent la signature devrait également peu varier.

Pour illustrer cette faible variation en fonction de l'orientation du véhicule, [CHE07] ont proposé un calcul de corrélation entre les signatures tri-axes mesurées pour trois angles de passage différents d'un même véhicule : 20 degrés vers la gauche, 20 degrés vers la droite, et 0 degré (ligne droite). Ils

ont obtenu des coefficients de corrélation de 0.85 à 0.99 pour un même véhicule, et de 0.64 à 0.67 pour deux véhicules différents, et en ont déduit que la signature magnétique d'un véhicule variait peu si le changement d'orientation était inférieur à 20 degrés.

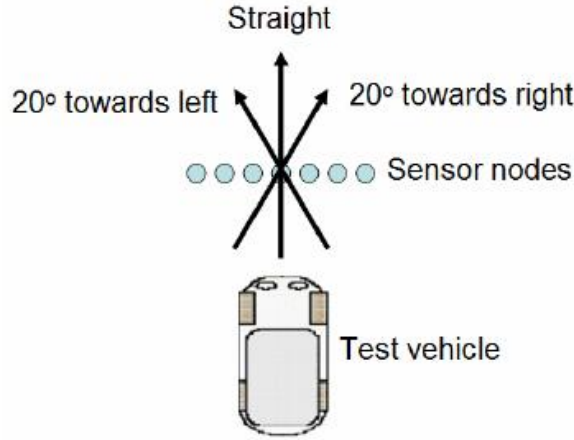


Figure 53 – Schéma des différents passages du véhicule test au-dessus des capteurs [CHE07]

Dans [CHE07], ils ont par ailleurs constaté une baisse de performance d'au moins 20% entre une ré-identification en ligne droite (93 à 100% de ré-identifications correctes) et une ré-identification d'un véhicule après un virage à 90 degrés (72% de ré-identifications correctes et 11% de fausses ré-identifications). Remarquons toutefois que le test en ligne droite a été réalisé avec une base de données de 7 véhicules, tandis que le test du virage a été réalisé avec 80 véhicules : la baisse de performance n'est donc peut-être pas entièrement due à une variation de la signature magnétique en fonction de l'orientation du véhicule.

Nous avons également étudié l'influence de l'orientation du véhicule sur les performances des méthodes de ré-identification. Il est important de noter que nos données expérimentales ont été mesurées uniquement sur un plan horizontal : ainsi, la valeur du champ magnétique terrestre B_{Ter} sur l'axe Z vertical est restée la même quelle que soit l'orientation des véhicules par rapport au Nord. L'aimantation induite par cet axe pour un véhicule donné n'a donc pas non plus été modifiée.

En restant dans un plan horizontal, il n'est ainsi pas possible de distinguer la part de la signature magnétique générée par l'aimantation permanente, et celle générée par l'aimantation induite par l'axe Z du champ magnétique terrestre. On appelle alors B_{inv} la part de la signature générée par la somme de ces deux aimantations : elle est invariante selon l'orientation du véhicule par rapport au Nord. A l'inverse, les valeurs du champ magnétique terrestre sur les axes X et Y vont varier en fonction de l'orientation des véhicules par rapport au Nord, et l'aimantation induite par ces deux axes va être modifiée. On appelle alors B_{var} la part de la signature générée par la somme de ces deux aimantations : elle varie selon l'orientation du véhicule par rapport au Nord.

Au final, la signature magnétique B_{vh} d'un véhicule mesurée dans le plan horizontal peut être exprimée de la façon suivante :

$$\vec{B}_{vh} = \vec{B}_{inv} + \vec{B}_{var} = \vec{B}(\vec{M}_{perm} + \vec{M}_{ind}(\vec{B}_{z_{Ter}})) + \vec{B}(\vec{M}_{ind}(\vec{B}_{x_{Ter}}) + \vec{M}_{ind}(\vec{B}_{y_{Ter}})) \quad (37)$$

Comparons à présent les performances obtenues pour des paires de signatures mesurées avec la même orientation par rapport au champ magnétique terrestre (paires NN, EE, SS, OO), et les

performances obtenues en prenant des paires de signatures mesurées avec des orientations différentes (paires NS, EO, NE, NO, SE, SO).

Les données utilisées sont celles du capteur central de janvier 2011, qui sont déclinées pour quatre orientations différentes. Rappelons l'ordre de grandeur du nombre de paires de signatures, en prenant par exemple le cas des paires de même orientation NN : 92 paires de signatures proviennent d'un même véhicule (Classe « même »), et 2053 paires de signatures proviennent de deux véhicules différents (Classe « différents »). Si l'on prend toutes les paires possibles (toutes orientations confondues), 3521 paires proviennent d'un même véhicule (Classe « même »), et 64600 proviennent de deux véhicules différents (Classe « différents »). Etant donné les précédents résultats, nous ne présentons ici que ceux obtenus par la distance euclidienne tridimensionnelle.

Données	Méthode	Même Orientation					Orientations différentes								
							Orientations à 90°					Orientations à 180°			Moyenne
		NN	EE	SS	OO	Moyen -ne	N E	N O	S E	S O	Moy.	N S	E O	Moy.	
Janv. 2011	Distance eucl. distXYZ	99 %	97 %	100 %	91 %	97%	88 %	83 %	83 %	80 %	84%	75 %	83 %	79%	82 %

Tableau 5 – Taux de bonnes détections sans erreur – Comparaison des résultats sans puis avec changement d'orientation du véhicule sur les données de janvier 2011.

Si l'on prend les paires de signatures avec des orientations différentes, le taux de bonnes détections BD atteint en moyenne 82%, sans aucune erreur. Notons qu'en moyenne, les taux obtenus pour un changement d'orientation de 90° ont atteint 84%, et 79% pour un changement d'orientation de 180° : faire demi-tour plutôt que prendre un virage à 90° semble donc diminuer le taux de bonnes détections de 5%.

Avec des paires de signatures ayant des orientations différentes (de 90° ou 180°), on observe donc en moyenne une baisse de 15% du taux de BD par rapport aux résultats pour des paires de signatures de même orientation. Cette baisse de performances reste faible : l'influence de l'orientation du véhicule sur les performances est donc limitée, lorsque le véhicule reste dans un plan horizontal. La part de B_{inv} , la signature invariante par rapport à l'orientation du véhicule dans le champ magnétique terrestre, est donc majoritaire par rapport à la part de B_{var} , la signature qui varie par rapport à l'orientation. Ainsi, la part d'aimantation permanente et d'aimantation induite par l'axe Z du champ magnétique terrestre est majoritaire par rapport à l'aimantation induite par les axes X et Y du champ terrestre. Notons qu'à ce stade, l'hypothèse d'une aimantation uniquement induite sur l'axe Z reste possible.

V.4.c Influence de l'accélération du véhicule

Le défaut majeur de la distance euclidienne est qu'il est nécessaire de remonter correctement aux signatures spatiales des véhicules, à partir de leurs signatures temporelles. Nous rappelons que nos prétraitements pour obtenir le vecteur spatial consistent simplement à multiplier le vecteur temporel par la vitesse v estimée par intercorrélation. Ainsi, si la signature temporelle est très déformée par une accélération du véhicule, la signature spatiale sera également déformée.

A l'inverse, l'algorithme DTW travaille directement sur les signatures temporelles, et est capable de les déformer pour mieux les aligner avant de calculer leur distance.

Nous avons donc testé ces deux méthodes de ré-identification sur nos données expérimentales de mars 2012, en comparant les performances obtenues pour des paires de signatures mesurées uniquement lors de passages à vitesse constante, et les performances obtenues pour des paires de signatures mesurées lors de passages à vitesse constante et lors de passages en accélération.

Pour les mesures de janvier 2011, la plaque de capteurs était suffisamment large pour que les véhicules roulent toujours avec la même position latérale au-dessus des capteurs. Les mesures de mars 2012 ont, elles, été effectuées avec une plaque de capteurs de largeur moindre, pour permettre aux véhicules d'être moins contraints en termes de vitesse de passage et de décalage latéral (§ IV.3).

Avec ces données, nous ne sommes donc pas sûrs que les véhicules aient toujours roulé avec la même position latérale au-dessus des capteurs. On ne va alors plus comparer systématiquement les paires de signatures mesurées par le capteur central : on va s'autoriser à apparier une signature S1 mesurée par un des cinq capteurs de la plaque (capteurs espacés de $\Delta y = 0.10\text{m}$), avec une autre signature S2 mesurée par un des cinq capteurs.

Le choix de la paire de capteurs se fait sur un critère d'intercorrélation maximum entre les cinq signatures spatiales S1 et les cinq signatures spatiales S2 possibles. Ce calcul se fait après alignement des signatures S1 et S2, et après ajout de zéros pour que S1 et S2 aient la même longueur N :

$$Choix(capt1, capt2) = \arg \max_{\substack{capt1 \in \{1;2;3;4;5\} \\ capt2 \in \{1;2;3;4;5\}}} \left(\sum_{k \in \{x,y,z\}} \left(\max_{\tau=-N+1}^{N-1} \left(C_{S1_k(capt1)S2_k(capt2)}(\tau) \right) \right)^2 \right) \quad (38)$$

Soit S1 et S2 mesurées respectivement par le capteur capt1 et le capteur capt2 : on garde donc la paire de capteurs (capt1, capt2) telle que la somme des carrés des maximums d'intercorrélation obtenus pour les axes X, Y, et Z de S1 et S2 soit maximale. La figure suivante illustre la façon dont se déroule le choix du capteur associé à la signature S1 et du capteur associé à la signature S2.

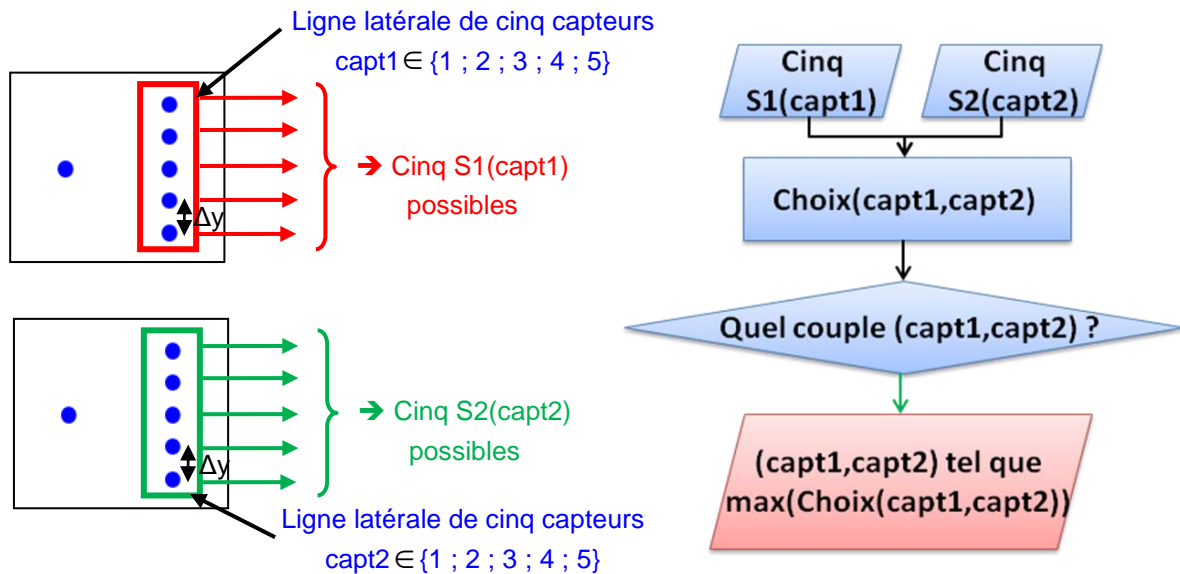


Figure 54 – Comparaison des signatures S1 et S2 : Schéma montrant comment se déroule le choix du capteur associé à la signature S1 (1 parmi 5) et le choix du capteur associé à la signature S2 (1 parmi 5)

Pour n'étudier que l'influence de l'accélération du véhicule, nous n'avons utilisé que des paires de signatures mesurées avec la même orientation, avec S1 correspondant à un passage à vitesse constante, et S2 correspondant à un passage en accélération.

Comme pour les paires de signatures mesurées uniquement lors des passages à vitesse constante, DTW obtient de moins bons résultats que la distance euclidienne : en effet, DTW 3D atteint au mieux 38% de bonnes détections sans aucune erreur, tandis que la distance euclidienne distXYZ atteint 94% sans aucune erreur.

Le tableau suivant récapitule les performances atteintes par DTW 3D et distXYZ sans aucune erreur de détection pour des couples de signatures (S1,S2) mesurées lors de passage de véhicules dans le sens Sud vers Nord :

- Essais 1-1 : pour des couples de signatures (S1,S2) mesurées lors de passages à vitesse constante et lente (soit 48 paires de signatures provenant du même véhicule, et 1080 provenant de véhicules différents)
- Essais 1-2 : pour des couples de signatures mesurées pour S1 lors de passages à vitesse constante et lente, et pour S2 lors de passages à vitesse constante et plus élevée (soit 16 paires de signatures provenant du même véhicule, et 240 provenant de véhicules différents)
- Essais 1-3 : pour des couples de signatures mesurées pour S1 lors de passages à vitesse constante et lente, et pour S2 lors de passages en accélération (soit 16 paires de signatures provenant du même véhicule, et 240 provenant de véhicules différents)

Essais	Méthode	Orientation NN
1-1	DTW3D	98%
	distXYZ	100%
1-2	DTW3D	63%
	distXYZ	100%
1-3	DTW3D	38%
	distXYZ	94%

Tableau 6 – Taux de bonnes détections obtenus par les deux méthodes de ré-identification comparées – Résultats sur les signatures de même orientation Nord VS Nord de mars 2012, pour différentes vitesses et accélérations

Sur nos données de mars 2012, la méthode DTW 3D semble beaucoup plus sensible aux variations de vitesse (Essais 1-2) et d'accélération (Essais 1-3) que la distance euclidienne tridimensionnelle distXYZ. En effet, par rapport aux signatures à vitesse constante et lente (Essais 1-1), DTW 3D perd jusqu'à 60% de bonnes détections, alors que distXYZ n'en perd au maximum que 6%. Toutefois, ces résultats ont été obtenus sur 16 paires de signatures uniquement : ils permettent donc de dégager une tendance, qui semble favorable à la distance euclidienne malgré une accélération des véhicules, mais pas de conclure de façon absolue.

Rappelons cependant que sur les données de janvier 2011, avec 2145 paires de signatures mesurées pour l'orientation Nord, nous avons déjà observé que sur des signatures mesurées à vitesse constante et lente, DTW3D obtenait de moins bons résultats que la distance euclidienne 3D (78% contre 99%).

La distance euclidienne tridimensionnelle semble donc obtenir de bien meilleurs résultats que DTW 3D, malgré une accélération des véhicules lors des mesures, alors que DTW doit en théorie être capable de gérer une vitesse variable de passage, et que la distance euclidienne suppose que la vitesse de passage est constante.

Plusieurs explications peuvent être apportées à ces résultats. La première concerne la qualité des données comparées : compte-tenu des dimensions du parking où les mesures ont été faites en mars 2012, les conducteurs des véhicules n'ont pu accélérer que d'une vitesse de 5 km/h à une vitesse de 30km/h maximum en passant au dessus des capteurs. Cette faible accélération n'a probablement pas assez déformé les signatures temporelles pour qu'il ne soit plus possible de calculer les signatures spatiales en supposant que la vitesse de passage était constante. La distance euclidienne a ainsi été peu perturbée par les passages en accélération.

Une deuxième explication concerne la légère variation de la forme des signatures d'un même véhicule entre deux passages. Il est ainsi possible qu'une bosse observée sur la signature magnétique temporelle d'un véhicule lors de son passage en accélération corresponde à deux pics sur la signature magnétique temporelle mesurée lors du passage à vitesse lente et constante.

Cette différence de forme peut par exemple provenir d'un sous-échantillonnage spatial lors du passage en accélération : plus le véhicule passe vite au-dessus des capteurs, moins ils ont le temps de mesurer les détails de sa signature spatiale. Rappelons que pour une période d'échantillonnage temporel T_e des capteurs, et un passage du véhicule à une vitesse v , la période d'échantillonnage

spatial équivalente vaut $\Delta x_0 = v \cdot T_e$. Une autre source de modification de la forme du signal est un décalage latéral différent du véhicule entre les deux passages.

Or la distance DTW est très sensible à la forme du signal (enchaînement des extrema) : ainsi, pour réduire la distance entre S1 et S2, l'algorithme DTW est prêt à déformer énormément le signal S1 de façon à ce que deux extrema se correspondent.

Voici l'exemple de deux signatures mesurées sur l'axe Y d'un capteur pour deux véhicules différents (le 1^{er} est passé à vitesse constante et lente, le 2^{ème} est passé en accélérant) :

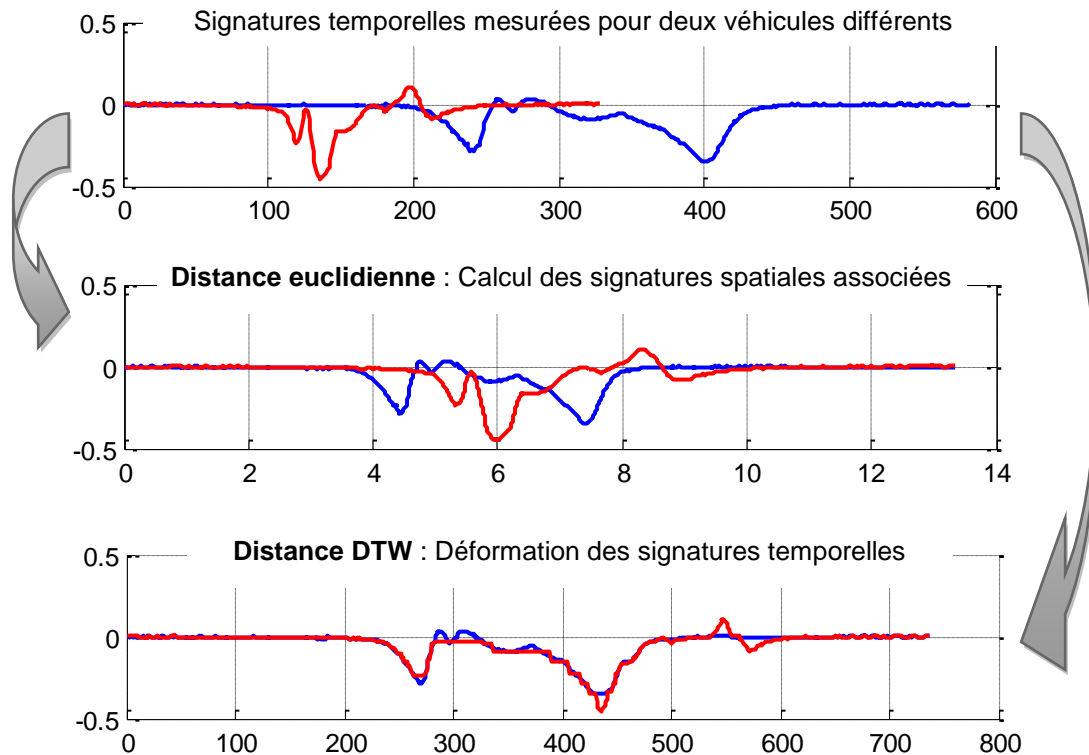


Figure 55 – Superposition de deux signatures mesurées sur l'axe Y deux véhicules différents, avec un passage à vitesse lente et constante (en bleu) et un passage en accélération (en rouge). En-dessous, l'alignement des signatures spatiales obtenu pour la méthode « distance euclidienne », puis le résultat de la déformation par l'algorithme DTW dans le but de réduire la distance entre les deux signatures temporelles.

Ainsi, dans cet exemple, la distance euclidienne entre les signatures sera grande, ce qui est cohérent avec le fait que ces deux signatures ne se ressemblent pas (ce qui est normal, car elles proviennent de deux véhicules différents). A l'inverse, après déformation des signatures temporelles par l'algorithme DTW, les deux signatures deviennent similaires, et leur distance DTW sera donc faible.

Cette capacité de déformation peut donc entraîner une faible distance entre deux signatures de véhicules différents (ou à l'inverse une non-ré-identification de deux signatures d'un même véhicule). Plaçons-nous dans le cas extrême où une petite voiture possède la même signature spatiale qu'une longue voiture, à une dilatation près :

Cas extrême : Signatures spatiales de deux véhicules différents, identiques à une dilatation près

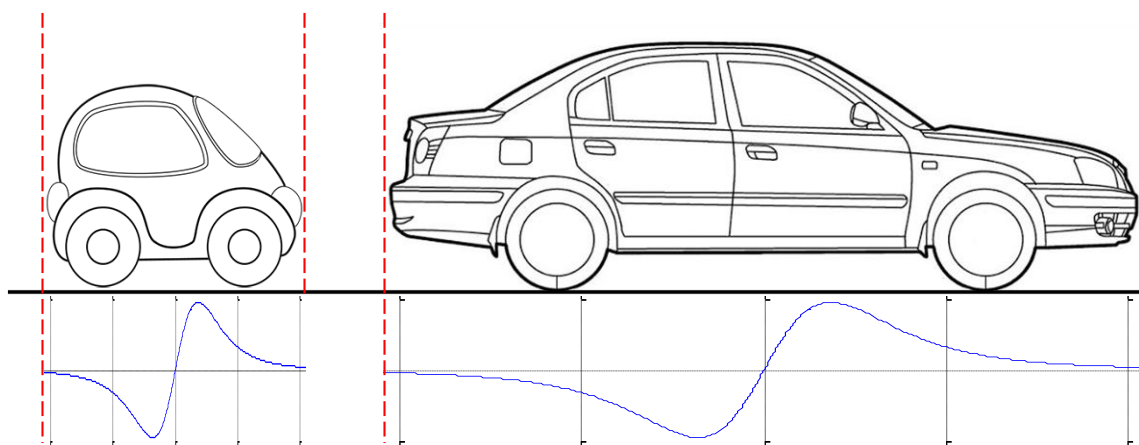


Figure 56 – Cas extrême où les signatures spatiales de deux véhicules différents sont identiques à une dilatation près.

Pour la distance DTW, ces deux signatures vont être identiques. Pour discriminer ce cas extrême, la distance euclidienne peut s'appuyer sur une information que la distance DTW n'a pas, à savoir l'estimation de la longueur du véhicule (connaissant sa vitesse de passage et la longueur de la signature mesurée).

Compte-tenu des moins bonnes performances obtenues par la distance DTW, nous n'indiquerons que les résultats de la distance euclidienne distXYZ dans le paragraphe suivant, qui présente l'influence du décalage latéral sur les performances de ré-identification.

V.4.d Influence du décalage latéral

Etudions enfin l'influence des variations du décalage latéral du véhicule lors de son passage au-dessus des capteurs. Celle-ci est utile pour déterminer à quelle fréquence spatiale doivent être disposés les capteurs magnétiques sur l'axe latéral de la chaussée, de façon à conserver des taux de bonnes détections suffisants pour une application de ré-identification.

En effet, si l'on place une ligne de capteurs espacés d'une distance dY sur l'axe latéral Y de la chaussée, la verticale du centre du véhicule sera toujours située à une distance maximale de $dY/2$ d'un des capteurs de la ligne.

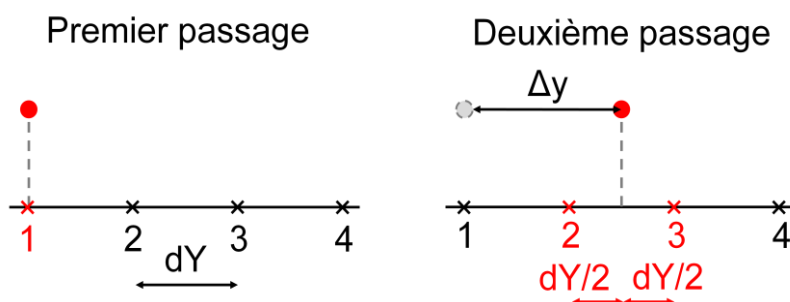


Figure 57 – Illustration de deux positions différentes du centre du véhicule (représenté par un point rouge) sur l'axe latéral Y lors de deux passages au-dessus des capteurs espacés de dY .

La figure ci-dessus illustre le passage d'un véhicule (dont le centre est représenté par un point rouge) au-dessus des capteurs, pour deux positions latérales différentes espacées de $\Delta y = 3 \cdot dY/2$. Lors du 1^{er} passage, le véhicule est passé au-dessus du capteur 1 : la verticale du centre du véhicule est donc située à une distance nulle d'un des capteurs de la ligne. Lors du 2^{ème} passage, le véhicule est passé entre les capteurs 2 et 3 : la verticale du centre du véhicule est donc située à une distance maximale de $dY/2$ par rapport aux capteurs 2 et 3.

Etant donné que l'on calcule les mesures de distances entre tous les couples de capteurs possibles, cela revient à ne considérer qu'un décalage latéral de $dY/2$ du véhicule, alors que son décalage réel Δy entre les deux passages est de $3 \cdot dY/2$ sur l'exemple ci-dessus.

Ce qui nous intéresse, c'est donc d'étudier les conséquences de la déformation de la signature du véhicule lorsque sa position latérale varie entre 0 et $dY/2$. Si, malgré un décalage latéral de $dY/2$, le taux de bonnes détections reste bon, alors on pourra placer un capteur tous les dY sur l'axe latéral de la chaussée.

Nous utilisons ici à la fois les données de janvier 2011, où nous avons des signatures mesurées tous les 0.25m, et les données de mars 2012, où nous avons des signatures mesurées tous les 0.10m. Dans le cas des données de janvier 2011 par exemple, sachant que le centre de la voiture a roulé au-dessus du capteur central, la comparaison des signatures mesurées par le capteur central et par un capteur à 0.25m du capteur central permet d'évaluer la déformation associée à un décalage $dY/2 = 0.25m$. Ainsi, comparer les signatures du capteur central avec un capteur de côté simule la présence d'un capteur tous les $dY = 0.50m$. Avec les données de mars 2012, on peut simuler la présence d'un capteur tous les 0.20m.

Pour les données de janvier 2011 :

- Nous prenons tout d'abord uniquement en compte les signatures mesurées par le capteur central de la plaque : on est alors dans le cas favorable où il n'y a pas de décalage latéral (le Tableau 4 du paragraphe § V.4.a en présentait les résultats pour les signatures mesurées du Nord vers le Sud)
- Puis nous prenons uniquement le capteur central pour la signature S1, et nous choisissons ensuite pour S2 la meilleure signature (toujours sur un critère d'intercorrélation maximum) entre celle mesurée par le capteur de gauche, et celle mesurée par le capteur de droite : on simule alors un décalage latéral de $dY/2 = 0.25m$, et donc la présence d'une ligne de capteurs espacés de $dY = 0.50m$ sur la chaussée.

Pour les données de mars 2012 :

- Nous reprenons les résultats du paragraphe précédent (Tableau 6, § V.4.c), qui correspondent à une ligne de capteurs espacés de 0.1m, avec sélection de la meilleure paire de capteurs parmi les 25 combinaisons possibles, sur un critère d'intercorrélation maximum,
- Puis nous limitons le choix des capteurs capt1 et capt2 à un capteur sur deux, comme illustré dans la figure suivante : on simule alors la présence d'une ligne de capteurs espacés de $dY = 0.20m$ sur la chaussée.

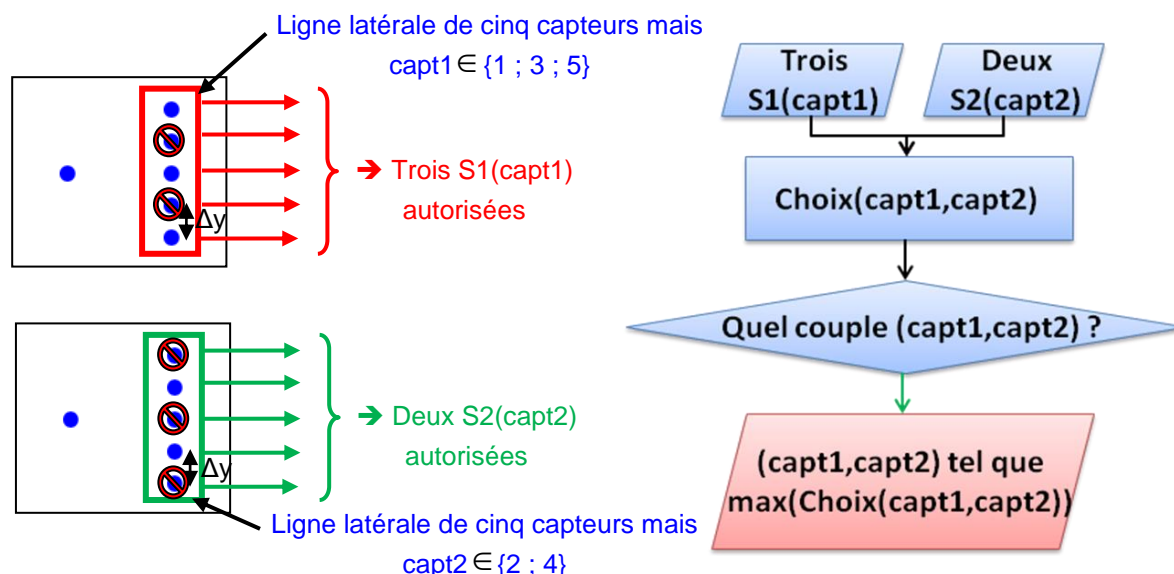


Figure 58 – Simulation « un capteur tous les 0.20m » pour mars 2012 : Trois choix possibles pour le capteur associé à la signature S1 (1 parmi 3) et deux choix du capteur associé à la signature S2 (1 parmi 2)

Le tableau qui suit indique les taux de bonnes détections sans aucune erreur pour des paires de signatures ayant la même orientation, en prenant différentes paires de capteurs.

Données	Capt1 / Capt2	Moyenne sur les orientations NN, EE, SS, OO
Janv.2011	Central / Central = Sans décalage latéral	97%
	Central / G,D = Simulation 1 capteur / 0.5m	39%
	Ecart	-58%
Mars2012	1 à 5 / 1 à 5 = 1 capteur / 0.1m	99%
	1,3,5 / 2,4 = Simulation 1 capteur / 0.2m	95%
	Ecart	-4%

Tableau 7 – Taux de bonnes détections sans aucune erreur obtenus par la distance euclidienne tridimensionnelle pour différentes paires de capteurs autorisées – Résultats sur les signatures de même orientation

Dans le cas de la simulation d'un capteur tous les 0.50m, et donc d'un décalage latéral maximal du véhicule de 0.25m, on observe une forte chute des performances : le taux de bonnes détections passe en moyenne de 97% à 39%, soit une baisse de 58%. Avoir un capteur tous les 0.50m ne suffit donc pas à assurer le taux de bonnes détections nécessaire pour notre application.

Dans le cas de la simulation d'un capteur tous les 0.20m, et donc d'un décalage latéral maximal du véhicule de 0.10m, nous obtenons des performances comparables à celles avec un capteur tous les 0.10m : on passe en moyenne d'un taux de 99% à un taux de 95%, soit une faible baisse de 4%.

Rappelons la Figure 18 du Chap.III, qui mettait en évidence la variation d'une signature magnétique réelle en fonction de la position du capteur sur l'axe latéral de la route :

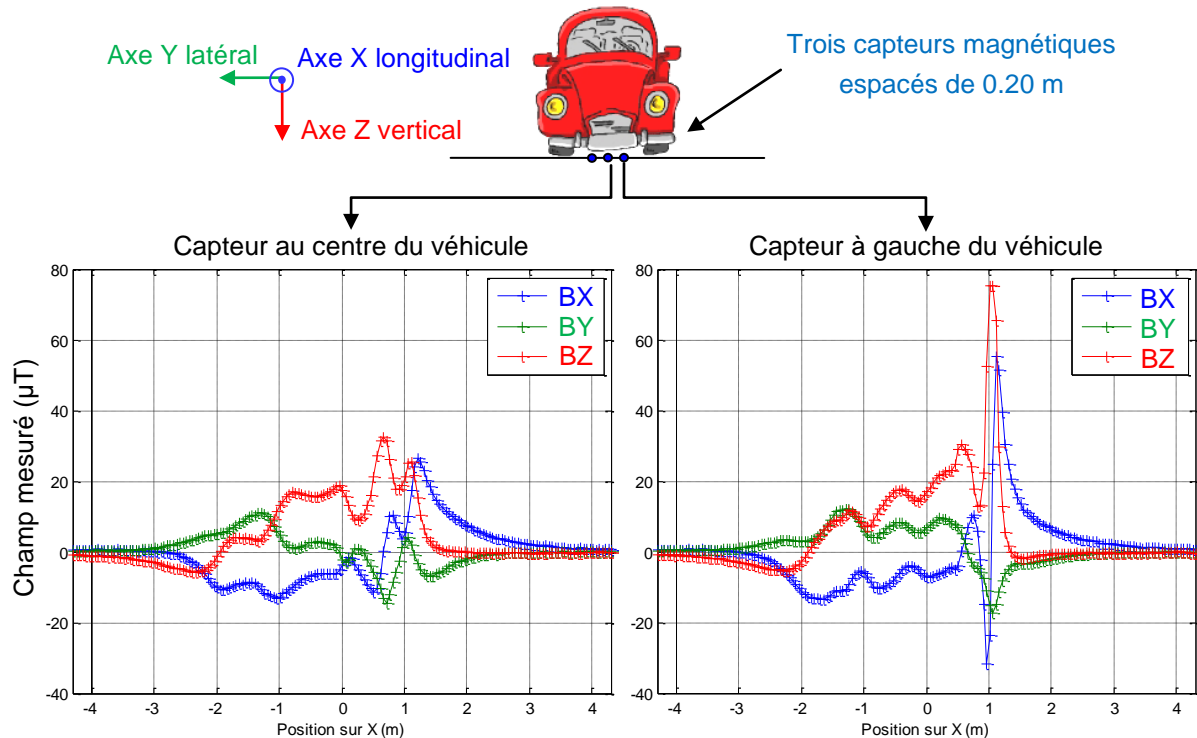


Figure 59 - Comparaison de la signature magnétique tri-axe d'un véhicule Renault Twingo mesurée par deux capteurs espacés de 0.20 m

D'après cette figure, un décalage latéral du véhicule de 0.20m entraîne une grande variation de la signature magnétique : la distance euclidienne entre ces deux signatures est alors a priori grande. Il est donc probable qu'un décalage latéral du véhicule de 0.20m entraîne que cette paire de signatures ne soit pas détectée comme provenant du même véhicule.

Le décalage latéral fait chuter les résultats de la ré-identification par comparaison directe de paires de signatures, car cette méthode est très sensible aux déformations des signatures, et que le champ magnétique généré par un objet aimanté dépend de la position du capteur par rapport à l'objet. Il est donc nécessaire de couvrir toute la largeur de la voie avec des capteurs espacés de 0.20m pour conserver des taux de bonnes détections acceptables. En effet, deux signatures d'un même véhicule seront alors mesurées avec un décalage latéral maximum de 0.10m, ce qui les déforme suffisamment peu pour qu'elles soient bien reconnues comme provenant d'un même véhicule.

V.4.e Méthode de ré-identification proposée et conclusions

La ré-identification de véhicules par comparaison de signatures spatiales magnétiques est possible avec une distance euclidienne tridimensionnelle, et ce malgré un changement d'orientation du véhicule et une accélération au-dessus des capteurs. Les autres méthodes de calcul de distances

entre paires de signatures testées, dont la distance DTW et la comparaison d'extrema, ont obtenu des performances bien moindres.

Lorsque le véhicule change d'orientation, le taux de bonnes détections sans erreur passe en moyenne de 97% à 82% sur les données de janvier 2011 avec la distance euclidienne tridimensionnelle, soit une baisse de 15%. Cette baisse de performances reste faible : l'influence de l'orientation du véhicule sur les performances est donc limitée lorsque le véhicule reste dans un plan horizontal. La part de la signature invariante par rapport à l'orientation du véhicule semble donc majoritaire par rapport à la part de la signature qui varie par rapport à l'orientation, et cela est très encourageant pour une application de ré-identification.

Lorsque le véhicule accélère, le taux de bonnes détections sans erreur passe 100% à 94% sur les données de mars 2012 avec la distance euclidienne tridimensionnelle, soit une baisse de 6%. En comparaison, ce taux passe de 98% à 38% avec la distance DTW 3D, alors que l'algorithme DTW doit en théorie être capable de gérer une vitesse variable de passage, et que la distance euclidienne suppose que la vitesse de passage est constante. Il semble donc que connaître une estimation de la longueur du véhicule (ce qui est le cas de la distance euclidienne mais pas de la distance DTW) facilite la ré-identification des véhicules. Notons cependant que la variation de vitesse a été plus faible lors de nos mesures (écart maximum de 25 km/h) que dans une application réelle, en particulier sur autoroute.

Toutefois, les performances de la distance euclidienne sont très sensibles à un décalage latéral du véhicule d'un site de mesure à l'autre : avoir un capteur tous les 0.5m plutôt qu'un capteur tous les 0.2m entraîne une chute des performances de 95% à 39%. Cette méthode de ré-identification nécessite donc de positionner un capteur tous les 0.20m sur toute la largeur de la voie pour limiter à 0.10m le décalage latéral maximum d'un véhicule entre deux passages. Une voie de circulation faisant 3.50m de large, il faut donc prévoir idéalement sur chaque site 18 capteurs espacés de 0.20m (permettant de couvrir 3.40m de chaussée), auxquels on ajoute un capteur dans l'axe longitudinal pour estimer la vitesse et remonter aux signatures spatiales à partir des signatures temporelles.

Pour réduire le nombre de capteurs, on peut imaginer limiter la zone couverte à celle parcourue par le centre d'un véhicule qui resterait sur sa voie. Un véhicule particulier fait moins de 2m de large. Si le véhicule se place le plus à gauche de sa voie, son centre est alors situé à 1m sur l'axe latéral Y. S'il se place le plus à droite, il est situé à 2.5m sur Y. Son centre parcourt donc une largeur de 1.5m : on peut alors prévoir sur chaque site de mesure 9 capteurs espacés de 0.20m (pour couvrir 1.60m de chaussée), plus un capteur pour la vitesse, soit 10 capteurs en tout.

Chaque site de mesure doit donc être composé d'une ligne latérale de plusieurs capteurs. Pour choisir la paire de capteurs des deux sites de mesure qui est la plus fortement corrélée spatialement, et donc pour compenser le décalage latéral du véhicule d'un point de mesure à l'autre, nous proposons de sélectionner la paire de capteurs dont les signatures obtiennent le maximum d'intercorrélation. La distance est alors calculée entre ces deux signatures uniquement.

VI. Ré-identification de véhicules via une modélisation magnétique

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié des méthodes de ré-identification par comparaison de paires de signatures de véhicules, en utilisant directement les signaux mesurés par les capteurs magnétiques, ou en extrayant certaines de leurs caractéristiques. Cette approche a obtenu de très bons résultats, mais ils sont très sensibles au décalage latéral du véhicule, et impliquent de placer des capteurs espacés de 0.20m idéalement sur toute la largeur de la voie, ou sur 1.5m de large.

Dans cette nouvelle partie, nous ajoutons à présent une transformation aux signatures avant d'effectuer la comparaison. A partir des signatures, nous remontons en effet à une modélisation magnétique des véhicules, et ce sont les paires de modèles qui sont comparées. Notre objectif est de répondre à la question suivante : est-ce que passer par une modélisation magnétique du véhicule permet d'être moins sensible au décalage latéral, et donc permet de réduire la fréquence des capteurs magnétiques nécessaires, tout en conservant de bonnes performances de ré-identification ?

Tout d'abord, nous expliquerons l'intérêt théorique de comparer un modèle magnétique du véhicule plutôt que sa signature magnétique (VI.1). Ensuite, nous verrons pourquoi il semble approprié de modéliser un véhicule civil passant au-dessus de capteurs magnétiques par un ensemble de dipôles, en s'appuyant sur une première référence ainsi que sur une comparaison entre des signatures mesurées et des signatures modélisées avec quelques dipôles (VI.2). Avant de décrire un état de l'art des méthodes de modélisation de tout type d'objets magnétiques (VI.4), les notions en résolution de problèmes inverses qui sont nécessaires pour l'appréhender sont introduites (VI.3). Enfin, la méthode de ré-identification à partir d'une modélisation magnétique est proposée et ses résultats sont présentés (VI.5).

VI.1 Intérêt d'une modélisation magnétique du véhicule

A partir d'une signature mesurée par les capteurs placés au sol, un modèle magnétique du véhicule est calculé. Le principe de la ré-identification à partir de modèles consiste à comparer les paramètres des modèles obtenus à partir de deux signatures différentes. Comment une modélisation pourrait permettre de s'affranchir du décalage latéral du véhicule ?

Rappelons que nous avons précédemment défini (III.1.a) ce qu'était un dipôle magnétique, et indiqué qu'à une distance d'observation r grande par rapport à la taille r' caractérisant le volume élémentaire du dipôle, le champ magnétique généré par le dipôle s'exprimait par :

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{3(\vec{m} \cdot \vec{r})\vec{r}}{\|\vec{r}\|^5} - \frac{\vec{m}}{\|\vec{r}\|^3} \right), \text{ avec } \vec{m} = I \cdot \vec{S} \text{ le moment magnétique du dipôle} \quad (39)$$

Les origines des vecteurs tridimensionnels \vec{r} et \vec{m} sont toutes les deux fixées au centre du dipôle :

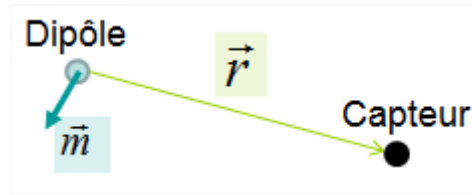


Figure 60 – Définition des origines des vecteurs r et m par rapport au dipôle et au capteur.

Nous allons pour l'instant admettre que le véhicule est modélisé par un ensemble de dipôles répartis dans son volume (le choix de cette modélisation sera justifié dans le paragraphe VI.2). On définit un repère X, Y, Z attaché aux capteurs, et dont l'origine est située à la position du capteur central de la plaque.

Les paramètres du modèle sont les suivants :

- N_d : le nombre de dipôles
- \vec{d}_l : la position tridimensionnelle absolue du l -ième dipôle dans le repère des capteurs
- \vec{m}_l : le moment tridimensionnel magnétique du l -ième dipôle dans ce même repère

La position \vec{c}_j tridimensionnelle de chaque capteur j est supposée connue. Pour chaque dipôle l et chaque capteur j , on peut définir le vecteur d'observation tridimensionnel suivant :

$$\vec{r}_{lj} = \vec{c}_j - \vec{d}_l \quad (40)$$

Pour faire de la ré-identification, les moments magnétiques des dipôles des deux modèles peuvent être comparés directement. Par contre, si l'on compare directement les positions absolues d_l des dipôles des deux modèles dans le repère des capteurs, celles sur l'axe Y vont varier en fonction du décalage latéral du véhicule.

Si l'on compare à présent les positions relatives des dipôles (exprimées les unes par rapport aux autres) sur l'axe Y , ces écarts ne vont pas varier en fonction du décalage latéral du véhicule :

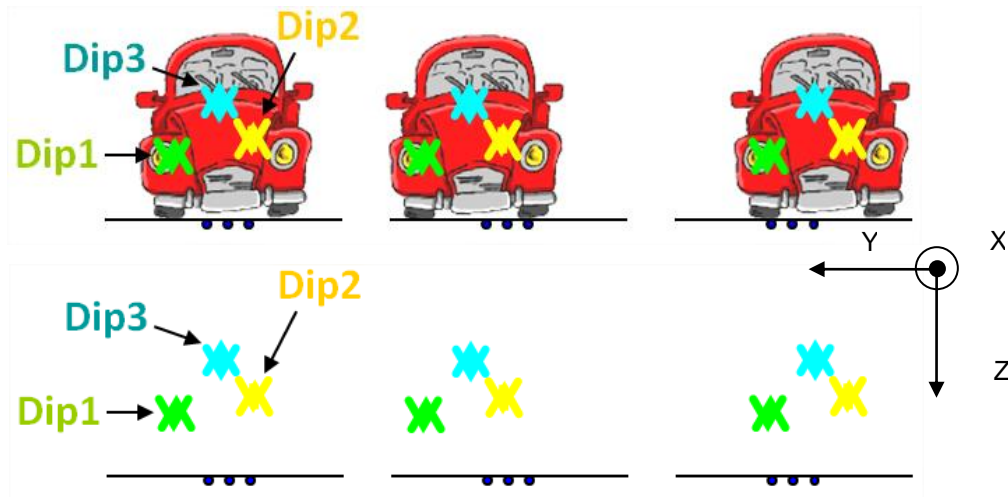


Figure 61 – Exemple de distribution de dipôles dans un véhicule. Les trois dipôles sont attachés au repère du véhicule et leurs positions absolues dans le repère des capteurs varient en fonction du décalage latéral du véhicule. Cependant, leurs positions relatives restent identiques quel que soit le décalage latéral.

Le décalage latéral avait fait chuter les résultats de la ré-identification par comparaison directe de paires de signatures, dans la mesure où le champ magnétique mesuré par le capteur dépend de la position du véhicule par rapport à ce capteur. L'intérêt de la méthode de ré-identification par modélisation est que la déformation de la signature due à un décalage du véhicule par rapport aux capteurs est prise en compte par le modèle, celui-ci remontant à la position des dipôles par rapport aux capteurs. La modélisation du véhicule doit donc permettre de s'affranchir du décalage latéral, en comparant les positions relatives des dipôles des deux modèles.

Justifions à présent le choix de modéliser un véhicule comme un ensemble de dipôles magnétiques.

VI.2 Modéliser un véhicule à l'aide de dipôles magnétiques

VI.2.a Signature magnétique d'un dipôle

Dans notre application de ré-identification de véhicules, les véhicules passent au-dessus des capteurs magnétiques immobiles. Le mouvement des véhicules se fait selon l'axe X longitudinal, et leurs déplacements selon l'axe Y latéral et selon l'axe Z vertical sont supposés nuls.

Simulons la signature d'un dipôle magnétique en mouvement rectiligne uniforme selon l'axe X, passant au-dessus d'un capteur tridimensionnel fixe. Le moment magnétique du dipôle est choisi orienté selon l'axe Z vertical, vers le bas, et de valeur 100 A.m^2 (ce modèle est justifié par [MAR78] qui sera évoqué dans le paragraphe VI.2.b suivant). Le dipôle est situé à une hauteur de 0.35m , et est décalé de 0.10m sur l'axe latéral par rapport au capteur.

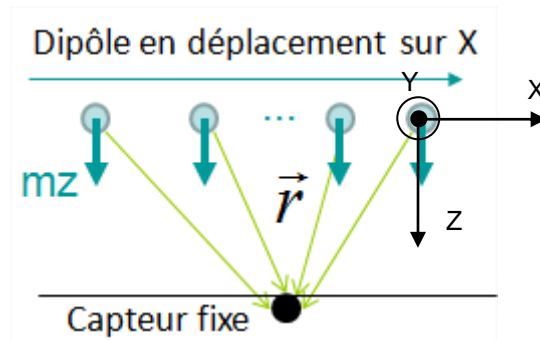


Figure 62 – Déplacement du dipôle au-dessus du capteur fixe. Le vecteur m est constant, tandis que le vecteur r varie en fonction de la position du dipôle par rapport au capteur.

Voici alors les champs mesurés par chacun des axes du capteur lors du passage du dipôle :

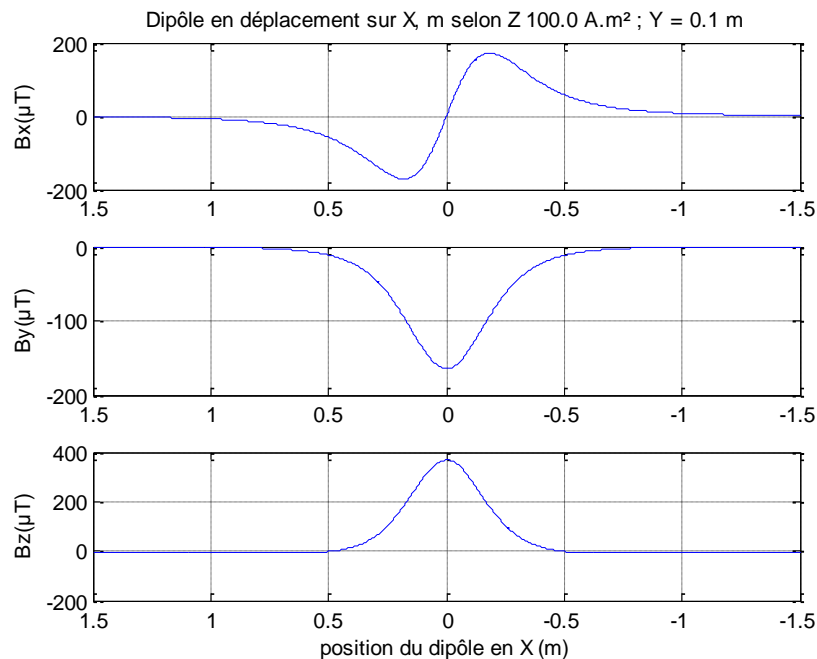


Figure 63 – Signature d'un dipôle magnétique en mz passant au-dessus d'un capteur fixe

Le passage d'un dipôle magnétique en mouvement rectiligne uniforme se traduit donc par une simple variation positive ou négative du signal, de forme gaussienne, ou par une seule oscillation positive puis négative du signal, avec passage à zéro. Chaque dipôle ne peut donc expliquer qu'un seul pic ou qu'une seule oscillation de la signature magnétique : plus la signature magnétique sera accidentée, plus elle devra être expliquée par un grand nombre de dipôles.

VI.2.b Première modélisation quantitative de véhicules civils

Ce paragraphe ne propose pas un état de l'art des modélisations magnétiques de véhicules, mais uniquement une première référence pour expliquer pourquoi il semble judicieux d'utiliser le dipôle magnétique pour modéliser un véhicule civil tel que ceux attendus dans une application de ré-identification appliquée à la gestion de trafic automobile.

Nous retrouvons trace de modélisations de véhicules civils par un dipôle magnétique dès 1978 [MAR78]. A partir de signatures mesurées (non reproduites dans l'article), l'auteur conclut qu'un véhicule peut être modélisé par un unique dipôle magnétique de 100 à 300 A.m², et que cette valeur est proportionnelle à la taille du véhicule. Ce dipôle est orienté verticalement vers le bas, car l'auteur suppose que l'aimantation est induite par le champ magnétique terrestre, proche de la verticale (Figure 52).

L'unique capteur magnétique, mono-axe orienté verticalement et vers le bas, est immobile au bord du trottoir, sur le côté de la route. Les véhicules sont supposés avoir un mouvement rectiligne uniforme lors de leur passage à proximité du capteur. La route est à double sens : le capteur mesure donc le passage de véhicules situés sur la voie la plus proche, à environ 3m du capteur, ainsi que sur la voie la plus éloignée, à environ 6m du capteur. Les véhicules peuvent donc avoir deux positions latérales différentes, qui sont supposées connues. Notons que la distance r entre le capteur et les véhicules est une distance comparable à une ou deux fois la longueur r' des véhicules.

La figure suivante est extraite de [MAR78] et correspond à deux signatures magnétiques simulées : une d'un véhicule passé à 3.05m du capteur (en noir), et une à 6.10m du capteur (en rouge). Le véhicule le plus proche génère une signature plus pointue et d'amplitude plus grande que le véhicule le plus éloigné.

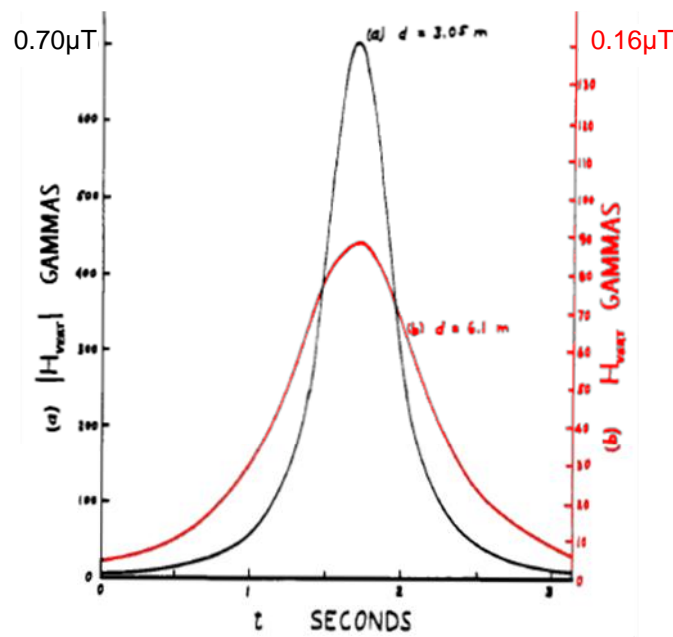


Figure 64 – Simulation de signatures de véhicules mesurées par un capteur fixe au bord de la route [MAR78].
Pour la courbe la plus pointue, $r = 3.14\text{m}$, pour la courbe la plus plate, $r = 6.15\text{m}$.

Cette 1^{ère} modélisation quantitative est obtenue à partir de signatures mesurées par des capteurs situés à une distance de l'ordre d'une ou deux longueurs du véhicule. A quelle modélisation peut-on s'attendre à partir de signatures mesurées par des capteurs situés à hauteur du sol, à une vingtaine de centimètres du châssis du véhicule, comme dans le cas de nos mesures ?

VI.2.c Le dipôle magnétique comme modèle élémentaire d'un objet magnétique

L'équation (39), qui exprime le champ magnétique généré par un unique dipôle, provient de la loi de Biot et Savart pour un circuit électrique fermé circulaire C de rayon r' , de déplacement infinitésimal $d\vec{l}$ le long de C, parcouru par un courant continu d'intensité I (se reporter à la Figure 10 et à l'équation (4)). Nous reprenons ici l'équation (4), qui indique la valeur du champ généré par ce circuit à une distance r .

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_C \frac{I d\vec{l} \wedge (\vec{r} - \vec{r}')}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|^3} \quad (41)$$

Dans l'équation (41), on s'intéresse en particulier à l'expression factorisée suivante :

$$\frac{1}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|} = \frac{1}{\|\vec{r}\|} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{\|\vec{r}'\|}{\|\vec{r}\|}\right)} = \frac{1}{\|\vec{r}\|} \cdot \frac{1}{(1 - e)} \text{ avec } e = \frac{\|\vec{r}'\|}{\|\vec{r}\|} \quad (42)$$

Dans le cas où r est suffisamment grand par rapport à r' , on peut calculer son développement limité de Taylor au voisinage de e égal 0. Pour obtenir l'expression du champ généré par un dipôle, seul le 1^{er} terme du développement est conservé [CAR96, ROB00, WAH10] : on considère alors que

$\frac{1}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|}$ vaut $\frac{1}{\|\vec{r}\|}$. L'annexe A.1 de [CAR96] propose une démonstration complète du passage de l'équation (41) à l'équation (39) en passant par l'expression du potentiel vecteur magnétique \vec{A} tel que $\vec{B} = \overrightarrow{rot}(\vec{A})$, et qui respecte la loi de Biot et Savart suivante :

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_C \frac{I d\vec{l}}{\|\vec{r} - \vec{r}'\|} \quad (43)$$

Un circuit électrique fermé circulaire C de rayon r' peut ainsi être modélisé par un dipôle magnétique respectant l'équation (39) si on l'observe à une distance r suffisamment grande par rapport à r' .

Considérons à présent un objet magnétique quelconque, de taille caractéristique r' . A une distance r suffisamment grande par rapport à r' , il pourra lui aussi être modélisé par un dipôle magnétique [BLA79]. [MAR78] semble donc se trouver à une distance suffisante du véhicule pour être dans ce cas.

Par contre, si l'on se rapproche de cet objet, et que r devient petite par rapport à r' , la modélisation par un seul dipôle ne sera plus suffisante pour expliquer toutes les variations du champ magnétique B. Plus l'on se rapproche de l'objet, moins l'approximation dipolaire est juste, et plus il faut conserver de termes du développement limité pour exprimer le champ B de la loi de Biot et Savart : on ne parle alors plus de dipôles, mais de quadripôles, puis d'octopôles magnétiques, et ainsi de suite.

Toutefois, si l'on s'autorise à diviser le volume de l'objet en plusieurs volumes élémentaires aimantés, leur propre taille r' sera de nouveau petite par rapport à la distance d'observation r , et chacun de ces nouveaux volumes pourra donc être modélisé par un dipôle. Un objet magnétique

observé à une distance r peut ainsi être découpé en un certain nombre de volumes élémentaires de taille r' , telle que r' soit petite par rapport à r , chaque volume étant modélisé par un dipôle. Si l'on pousse le découpage à la plus petite échelle physique, on peut considérer chaque domaine de Weiss (§ III.1.c) comme un dipôle.

Le dipôle magnétique peut alors être défini comme modèle élémentaire d'un objet magnétique. L'objet magnétique est modélisé par un ensemble de dipôles répartis dans son volume. Le champ magnétique généré par l'objet au niveau d'un capteur j est la somme des champs générés par chacun des N_d dipôles qui le compose :

$$\vec{B}(\{\vec{r}_{lj}, \vec{m}_l\}_{l=1:N_d}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{l=1}^{N_d} \left(\frac{3(\vec{m}_l \cdot \vec{r}_{lj})\vec{r}_{lj}}{\|\vec{r}_{lj}\|^5} - \frac{\vec{m}_l}{\|\vec{r}_{lj}\|^3} \right) \quad (44)$$

Dans l'expression du champ B , seule la somme des champs générés par les dipôles contenus dans le volume de l'objet magnétique intervient.

Si l'on souhaite distinguer la part d'aimantation induite M_{ind} (qui dépend de B_{Ter}) et permanente M_{perm} dans le véhicule, il faut distinguer dans le modèle les moments induits m_{ind} et permanents m_{perm} de chaque dipôle. Rappelons que l'aimantation et le moment magnétique sont directement reliés par le volume de l'objet magnétique (équation (3)).

Dans l'équation (44), m_l doit alors être remplacé par la somme de m_{lind} et m_{lperm} :

$$\vec{m}_l = \vec{m}_{lind}(\vec{B}_{Ter}) + \vec{m}_{lperm} \quad (45)$$

Rappelons également que l'aimantation induite va générer le champ magnétique induit B_{ind} , et l'aimantation permanente le champ magnétique permanent B_{perm} (équation (10)). Avec le modèle proposé équation (44), B_{perm} et B_{ind} de l'équation (10) s'expriment respectivement :

$$\vec{B}_{perm}(\{\vec{r}_{lj}, \vec{m}_{lperm}\}_{l=1:N_d}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{l=1}^{N_d} \left(\frac{3(\vec{m}_{lperm} \cdot \vec{r}_{lj})\vec{r}_{lj}}{\|\vec{r}_{lj}\|^5} - \frac{\vec{m}_{lperm}}{\|\vec{r}_{lj}\|^3} \right) \quad (46)$$

$$\vec{B}_{ind}(\{\vec{r}_{lj}, \vec{m}_{lind}(\vec{B}_{Ter})\}_{l=1:N_d}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{l=1}^{N_d} \left(\frac{3(\vec{m}_{lind}(\vec{B}_{Ter}) \cdot \vec{r}_{lj})\vec{r}_{lj}}{\|\vec{r}_{lj}\|^5} - \frac{\vec{m}_{lind}(\vec{B}_{Ter})}{\|\vec{r}_{lj}\|^3} \right) \quad (47)$$

Etant placés au niveau de la route, nos capteurs sont très proches du véhicule par rapport à sa taille, et nous ne pouvons donc pas le modéliser avec un seul dipôle comme dans [MAR78], où les capteurs et le véhicule étaient distants d'au moins une longueur du véhicule.

Par contre, il semble pertinent de le modéliser par un ensemble de dipôles, sans être contraints d'utiliser des modèles magnétiques plus complexes comme des quadrupôles ou des octopôles.

VI.2.d Modélisation d'un véhicule avec quelques dipôles

En première approche de modélisation de signatures avec quelques dipôles, comparons la signature magnétique d'un véhicule mesurée par un capteur placé sur la route, avec la signature simulée de trois dipôles magnétiques en mouvement rectiligne uniforme.

Cette modélisation à trois dipôles a été obtenue à l'aide d'un algorithme d'optimisation de type Levenberg-Marquardt, où nous autorisons la variation des positions et des moments magnétiques des dipôles dans les trois dimensions de l'espace X, Y, et Z (cet algorithme est présenté dans le paragraphe « Résoudre un problème inverse non linéaire » en paragraphe §VI.3.c).

Un score pour évaluer l'écart entre la signature spatiale mesurée B et la signature modélisée B_{mod} a été défini comme une erreur relative entre B et B_{mod} . Il s'exprime sans unité, et donne un pourcentage d'écart au signal mesuré plutôt qu'un écart absolu :

$$Score = \sqrt{\frac{\|\vec{B} - \vec{B}_{\text{mod}}\|^2}{\|\vec{B}\|^2}} \quad (48)$$

Plus ce score est faible, plus la différence entre le modèle et la mesure est faible.

Sur l'image ci-dessous :

- les signatures mesurées par un capteur sont représentées respectivement en bleu, vert, et rouge pour les axes X, Y, et Z,
- les signatures simulées par la somme de trois dipôles en mouvement sont représentées respectivement en cyan, vert pâle, et magenta pour les axes X, Y, et Z. Les signatures de chacun des trois dipôles sont de plus représentées en traits plus fins,
- les positions et moments magnétiques tridimensionnels des trois dipôles, ainsi que les scores des modèles sont indiqués en bas de l'image.

Dans la figure qui suit, on observe une certaine ressemblance entre les signatures mesurées et les signatures modélisées à l'aide de trois dipôles magnétiques, en particulier dans les variations basses fréquences des signatures et dans leurs oscillations comprises entre $X = -3\text{m}$ et $X = 1\text{m}$. Pour mieux modéliser la signature mesurée, il semble qu'il soit nécessaire d'ajouter au moins un dipôle aux alentours de $X = 1.5\text{m}$: en effet, une oscillation sur B_x et B_z n'est pas simulée par le modèle à trois dipôles à cet endroit.

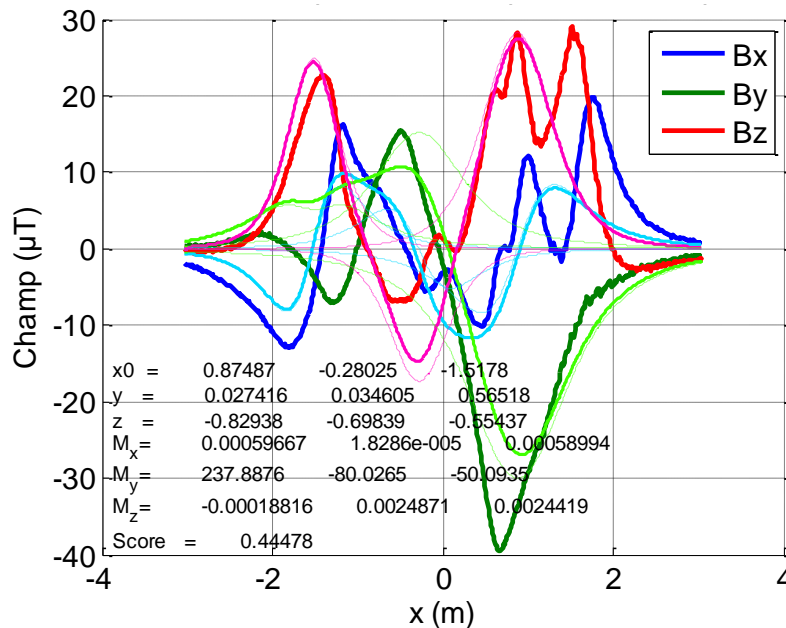


Figure 65 – Signature d'un véhicule Dacia Sandero superposée avec la signature d'un modèle composé de trois dipôles

Cette ressemblance se traduit par un score de 44%, ce qui signifie que le modèle à trois dipôles explique plus de la moitié des signatures mesurées. Pour mieux expliquer les variations des signatures, il faudrait utiliser un plus grand nombre de dipôles répartis sur l'axe X longitudinal.

Cette première illustration sur une signature réelle montre qu'il semble possible de générer les signatures mesurées à l'aide d'un modèle composé de quelques dipôles, sans utiliser de quadrupôles ou d'octopôles, et ce bien que les capteurs soient très proches du véhicule. Sur cette 1^{ère} signature mesurée, le nombre de dipôles minimum à utiliser serait donc de quatre.

Dans le cas d'une distribution à plusieurs dipôles, rappelons que le champ magnétique s'exprime comme la somme des champs générés par chacun des dipôles modélisant l'objet magnétique (équation (44)). Plusieurs distributions différentes peuvent générer ce même B [FLA92, CAR92, LEG96, CHA01]. Sans ajouter des contraintes sur les dipôles (en fixant par exemple leur nombre et leur position), il est donc peu probable de remonter à la distribution initiale à partir de B, surtout s'il n'est mesuré qu'en quelques points. Ce problème inverse est donc mal posé car la solution n'est pas unique.

Nous avons effectué une 1^{ère} tentative de modélisation des véhicules avec trois ou quatre dipôles dont la position pouvait varier, tout en restant dans un intervalle contraint. Nous étions alors dans le cas d'un problème inverse non-linéaire, que nous avons résolu avec un algorithme de Levenberg-Marquardt. Cependant, les solutions obtenues à partir des signatures d'un même véhicule variaient trop pour être utilisées dans une application de ré-identification, ce qui est cohérent avec le caractère mal posé du problème. Cette étude n'est donc pas présentée dans ce mémoire.

Pour contraindre encore plus les solutions, nous avons alors préféré fixer la position des dipôles par rapport aux capteurs. Le problème inverse devient linéaire. Toutefois, pour modéliser toutes les signatures mesurées, il faut a priori prévoir plus que trois ou quatre positions différentes pour les dipôles. Le choix du nombre et des positions des dipôles sera discuté au paragraphe VI.5.a.

A partir du champ magnétique B mesuré par les capteurs, on souhaite donc remonter à une distribution de N_d dipôles magnétiques caractérisés par leurs moments magnétiques m_i , inconnus, et par leurs positions absolues d_i connues dans le repère tridimensionnel X, Y, Z associé aux capteurs. Les positions absolues c_j des N_c capteurs étant connues, les positions absolues des dipôles permettent ensuite de calculer r_{ij} , le vecteur reliant la position du capteur j avec la position du dipôle i .

Ce type de problème est appelé « problème inverse linéaire », et est développé dans le paragraphe suivant. Le lecteur qui le souhaite pourra directement passer au paragraphe §VI.4 pour y trouver un état de l'art des modélisations d'objets magnétiques par une distribution de dipôles.

VI.3 Résolution d'un problème inverse

Ce paragraphe ne se veut pas mathématiquement exhaustif : il vise juste à introduire le vocabulaire et les notions nécessaires pour appréhender la modélisation magnétique, en s'appuyant sur les références suivantes [PET08, KER03, GRA12].

VI.3.a Problème direct et problème inverse

Le problème direct comme le problème inverse reposent sur la modélisation d'un système physique réel. Suite à des stimuli d'entrée p , on mesure une réponse w du système. En supposant que les paramètres d'entrée p sont connus, l'objectif du modèle g est de simuler cette mesure. La sortie du modèle g est notée w_{mod} :

$$\vec{w}_{\text{mod}} = g(\vec{p}) \quad (49)$$

Dans l'idéal, si le modèle était parfait et tous les paramètres p connus, w_{mod} serait égal à w .

Dans le cas d'un problème « direct », on connaît les paramètres d'entrée p , ou « causes », ainsi que le modèle g , et l'on cherche alors à prédire la réponse du système à ces causes en calculant w_{mod} . Dans le cas d'une modélisation dipolaire par exemple, connaissant les moments magnétiques m_i des dipôles, ainsi que leurs positions absolues d_i dans le repère du capteur (de position c connue), on peut calculer le champ magnétique $B_{\text{mod}}(\{(c - d_i), m_i\})$ théoriquement généré au niveau du capteur.

Dans le cas d'un problème « inverse », on a mesuré les effets w , et l'on suppose que le modèle g est connu : on cherche alors les causes p qui ont pu produire les effets mesurés. Toujours dans le cas d'une modélisation dipolaire, un problème inverse consiste par exemple à retrouver la distribution de dipôles à l'origine du champ magnétique B mesuré par un ou plusieurs capteurs.

Une notion très importante dans la résolution de problèmes inverses est celle de problème bien ou mal posé. Un problème bien posé a ainsi été défini par Hadamard :

- *existence* : il existe toujours une solution au problème,
- *unicité* : la solution est unique (plusieurs causes ne peuvent expliquer les mêmes effets),
- *stabilité* : la solution dépend des données de façon continue (une petite erreur de mesure n'entraîne qu'une petite variation de la solution).

Lorsque la solution exacte d'un problème n'existe pas, on autorise la recherche de « quasi-solutions ». Une quasi-solution permet de reproduire les effets à un petit écart epsilon près, et est alors considérée comme une solution acceptable.

Lorsque la solution d'un problème inverse n'est pas unique, il faut apporter des informations supplémentaires au système pour pouvoir choisir la solution qui nous convient le plus parmi toutes les solutions possibles. Ces informations peuvent consister en des mesures supplémentaires, et/ou en des contraintes sur les caractéristiques de la solution (à l'aide de connaissances a priori). Cela n'est pas toujours suffisant, et il faut parfois faire un choix parmi les solutions obtenues : solution de norme minimale, solution la plus proche d'une solution de référence, ...

Etre en présence d'un problème inverse instable est moins évident à gérer. Nous verrons plus loin comment améliorer la stabilité d'un problème.

Définissons ensuite les notions de sur- et de sous-détermination pour un problème possédant q équations (donc q mesures) pour n inconnues à déterminer :

- *sous-déterminé* ($q < n$) : le problème possède moins d'équations, donc moins de mesures, que d'inconnues, donc que de paramètres à trouver. La solution n'est alors pas unique, et il faut ajouter de l'information au système, en fixant par exemple $(n - q)$ inconnues. Des méthodes de régularisation peuvent être appliquées.
- *surdéterminé* ($q > n$) : le problème possède cette fois plus d'équations que d'inconnues. Ce cas semble plus favorable pour trouver la solution : il est plus robuste car moins sensible aux mauvaises mesures. Cependant, à cause du bruit de mesure b , on ne mesure plus w mais $(w + b)$, et les équations peuvent alors se contredire. Cela peut freiner voire empêcher la convergence vers la solution, en particulier si le problème est instable.
- $q = n$: le problème possède autant d'équations que d'inconnues. Ce cas est mathématiquement le plus simple. Mais attention : les résultats seront alors très sensibles à une mauvaise mesure.

Enfin, distinguons les problèmes inverses linéaires des problèmes inverses non linéaires, car leurs méthodes de résolution sont très différentes. Dans le cas d'un problème linéaire, le vecteur colonne w des q mesures s'exprime de façon linéaire par rapport au vecteur colonne p des n inconnues, et peuvent donc être reliées par une matrice G de taille $\langle q \times n \rangle$:

$$\vec{w}_{\text{mod}} = G \cdot \vec{p} \quad (50)$$

Un travail est alors réalisé sur la matrice G . Dans le cas d'un problème non linéaire, une telle simplification n'est pas possible, et on a recours à des algorithmes d'optimisation itératifs pour converger vers la solution.

Illustrons la différence dans le cas de la modélisation d'un objet magnétique par un dipôle. On suppose que le champ magnétique B est connu en un point de mesure par un capteur tridimensionnel de position c connue : nous avons donc trois mesures à notre disposition.

- *problème linéaire* : les positions c du capteur et d du dipôle sont connues, donc les trois composantes r_x , r_y et r_z du vecteur r reliant le dipôle au capteur sont connues ($r = c - d$). Il reste à déterminer les trois composantes m_x , m_y et m_z du moment magnétique m : nous

avons donc trois inconnues. On peut alors exprimer le champ magnétique B tridimensionnel sous la forme suivante : $\vec{B} = C(\vec{r}) \cdot \vec{m}$, $C(r)$ étant la matrice $<3 \times 3>$ symétrique suivante (le détail des calculs se trouve dans l'annexe suivante « Expression du champ magnétique généré par un dipôle dans le cas d'un problème inverse linéaire » §.VIII.1) :

$$C(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{1}{\|\vec{r}\|^3} \cdot \begin{bmatrix} \frac{3r_x^2}{\|\vec{r}\|^2} - 1 & g_{12} = \frac{3r_x \cdot r_y}{\|\vec{r}\|^2} & g_{13} = \frac{3r_x \cdot r_z}{\|\vec{r}\|^2} \\ g_{21} = g_{12} & \frac{3r_y^2}{\|\vec{r}\|^2} - 1 & g_{23} = \frac{3r_y \cdot r_z}{\|\vec{r}\|^2} \\ g_{31} = g_{13} & g_{32} = g_{23} & \frac{3r_z^2}{\|\vec{r}\|^2} - 1 \end{bmatrix} \quad (51)$$

- *problème non linéaire* : seule la position c du capteur est connue, et la position d comme le moment m du dipôle sont inconnus. Il n'est pas possible de factoriser davantage l'expression non linéaire suivante :

$$\vec{B}(\vec{p}) = \vec{B}(\vec{d}, \vec{m}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{3(\vec{m} \cdot (\vec{c} - \vec{d}))(\vec{c} - \vec{d})}{\|\vec{c} - \vec{d}\|^5} - \frac{\vec{m}}{\|\vec{c} - \vec{d}\|^3} \right) \quad (52)$$

Etudions à présent comment évaluer et résoudre un problème inverse linéaire, puis un problème inverse non linéaire.

VI.3.b Résoudre un problème inverse linéaire

Dans le cas d'un problème linéaire, le vecteur w des mesures s'exprime donc de façon linéaire par rapport au vecteur p des inconnues, et ils peuvent donc être reliés par une matrice G correspondant au modèle du système physique (équation (50)).

Comment se traduisent les trois caractéristiques d'un problème bien posé sur la matrice G ?

- *existence* : il existe toujours une solution au problème : quel que soit w , $p = G^{-1} \cdot w$ est calculable. L'application linéaire que la matrice G représente est donc surjective.
- *unicité* : la solution est unique : quel que soit w , $p = G^{-1} \cdot w$ est unique. L'application linéaire que la matrice G représente est donc injective.
- *stabilité* : la solution dépend des données de façon continue : ce caractère est mesuré par le « conditionnement » de G , qui quantifie l'indépendance entre les colonnes de la matrice G .

Plus le conditionnement est grand, plus le problème est instable : de toutes petites perturbations de w (dus par exemple au bruit de mesure) entraîneront de grands changements dans la solution p trouvée. Le conditionnement dépend d'une norme matricielle. Si l'on choisit par exemple la norme euclidienne, le conditionnement d'une matrice G , rectangulaire ou carré, est défini par :

$$\text{cond}(G) = \|G\| \cdot \|G^{-1}\| = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} \quad (53)$$

λ_{\min} et λ_{\max} étant respectivement la plus petite et la plus grande des valeurs singulières de G . Les valeurs singulières sont toutes strictement positives, donc le conditionnement l'est également. De plus, étant donné que l'on divise la plus grande valeur par la plus petite valeur, le conditionnement est supérieur ou égal à 1.

Voici l'interprétation des valeurs du conditionnement :

- Si $\text{cond}(G)$ tend vers 1 : Le problème est alors très bien conditionné. Les colonnes de G sont presque orthogonales, de produit scalaire pratiquement nul, donc elles sont indépendantes. Le cas extrême où $\text{cond}(G)$ vaut 1 se produit lorsque G est une matrice orthogonale ($G^T G = G G^T = I_d$).
- Si $\text{cond}(G)$ tend vers l'infini : Le problème est alors très instable. La valeur singulière minimale de G est presque nulle, donc les colonnes de G sont très liées et pratiquement linéairement dépendantes. Si la matrice G est carrée, elle sera non inversible (ou « singulière ») et donc de déterminant nul.

Notons toutefois que le déterminant et le conditionnement d'une matrice ne sont pas directement liés : une matrice avec un mauvais conditionnement (problème instable) peut être parfaitement inversible (la solution existe).

Le conditionnement permet de majorer l'erreur relative $\|dp\| / \|p\|$ commise sur p en fonction de l'erreur relative $\|dw\| / \|w\|$ commise sur w , ou en fonction de l'éventuelle l'erreur relative $\|dG\| / \|G\|$ commise sur G :

$$\frac{\|dp\|}{\|p\|} \leq \text{cond}(G) \cdot \frac{\|dw\|}{\|w\|} \text{ et } \frac{\|dp\|}{\|p\|} \leq \text{cond}(G) \cdot \frac{\|dG\|}{\|G\|} \quad (54)$$

A partir de quel conditionnement considère-t-on que le problème inverse linéaire est instable ? D'après la majoration de l'erreur relative décrite ci-dessus, le seuil acceptable de $\text{cond}(G)$ dépend du bruit de mesure et de l'erreur relative acceptable sur la solution. Si l'on accepte par exemple une erreur relative de 1% sur la solution, et que l'erreur relative sur la mesure est de 1%, le conditionnement devra être de 1. Si l'erreur relative sur la mesure est maintenant de 0.01%, le conditionnement maximal sera de 100. Un conditionnement de plus de 1000 est toutefois empiriquement considéré comme mauvais.

En étudiant la matrice G , il est donc possible de déterminer le caractère bien ou mal posé du problème inverse linéaire à résoudre. Voyons à présent comment remonter à p à partir de w et de G .

Dans de rares cas, la matrice G est carrée (donc avec autant de mesures que d'inconnues), inversible, bijective, et son conditionnement est égal ou très proche de 1. Le problème est alors très bien posé, et il est possible de calculer simplement p en inversant G : $p = G^{-1} \cdot w$.

Dans tous les autres cas, il est impossible ou dangereux de calculer p en inversant directement G . On définit alors un problème des moindres carrés, pour élargir les cas solvables : on cherche à présent la solution p telle que l'écart, où le « coût », entre la mesure w et le modèle $G \cdot p$ soit minimal :

$$\min(\text{Coût}(\vec{p})) = \min(\|\vec{w} - G.\vec{p}\|^2) = \min\left({}^t(\vec{w} - G.\vec{p})(\vec{w} - G.\vec{p})\right) \quad (55)$$

En calculant le gradient de ${}^t(\vec{w} - G.\vec{p})(\vec{w} - G.\vec{p})$, on montre que chercher ce minimum revient à résoudre :

$${}^tG.(\vec{w} - G.\vec{p}) = 0 \text{ ce qui s'écrit aussi } ({}^tG.G).\vec{p} = {}^tG.\vec{w} \quad (56)$$

Cette dernière équation est appelée « équation normale », et correspond à un nouveau problème inverse linéaire, avec cette fois une matrice $({}^tG.G)$ à inverser qui est toujours carrée. Une estimation de p au sens des moindres carrés, appelée p_{MCO} , est donc définie par :

$$\vec{p} \approx \vec{p}_{MCO} = ({}^tG.G)^{-1}.({}^tG).\vec{w} \quad (57)$$

Etant donné que l'on travaille en dimensions finies (car les vecteurs p et w et la matrice G sont de taille finie et sont normés), il existe au moins une solution à l'équation normale, appelée « pseudo-solution », et une seule de ces solutions est de norme minimale.

Il n'y a que deux cas où il n'existe qu'une seule pseudo-solution. Ces deux cas reposent sur le rang de la matrice G (le rang correspond au nombre maximal de lignes, ou de colonnes, de G qui sont linéairement indépendantes) :

- si G est une matrice carrée $\langle n \times n \rangle$ et que son rang est égal à n , qui est son rang maximum, alors G est inversible. La pseudo-solution du problème des moindres carrés est unique. Attention, même si G est inversible, le problème linéaire peut être instable.
- si G est une matrice rectangulaire $\langle q \times n \rangle$ et que son rang est maximum (par exemple, dans le cas surdéterminé où $q > n$, le rang maximum vaut n), alors ${}^tG.G$ est carrée définie positive et donc inversible. La pseudo-solution du problème des moindres carrés est unique. Attention, même si ${}^tG.G$ est inversible, le problème linéaire peut être instable, d'autant plus que le $\text{cond}({}^tG.G) = \text{cond}(G)^2$.

Passer de la résolution d'un problème inverse linéaire à la résolution d'un problème des moindres carrés améliore le caractère d'« existence » d'une solution, mais pas sa stabilité. Pour rendre un problème des moindres carrés plus stable, on peut ajouter une régularisation. Cela se fera au détriment de la précision sur la solution calculée : on modifie le problème initial pour le rendre plus stable, tout en obtenant une solution *proche* de celle attendue. Les deux méthodes de régularisation les plus courantes sont la régularisation de Tikhonov, et la régularisation par troncature de spectre.

VI.3.b.1 Régularisation de Tikhonov

La régularisation de Tikhonov modifie l'expression du problème des moindres carrés, en introduisant une contrainte supplémentaire, pondérée par un paramètre $\alpha > 0$, a priori petit :

$$\min(\|\vec{w} - G.\vec{p}\|^2) \text{ devient } \min(\|\vec{w} - G.\vec{p}\|^2 + \alpha.\|\vec{p} - \vec{p}_0\|^2) \quad (58)$$

L'ajout d' α améliore le conditionnement du problème en augmentant les plus petites valeurs singulières de ${}^tG.G$. On note qu'en choisissant un vecteur p_0 nul, on force la solution à être de norme minimale. On peut alors montrer que le problème est équivalent au problème suivant :

$$\left({}^t G.G + \alpha.Id\right)\vec{p} = {}^t G.\vec{w}, \text{ avec } \text{cond}\left({}^t G.G + \alpha.Id\right) = \frac{\lambda_{\max}\left({}^t G.G\right) + \alpha}{\lambda_{\min}\left({}^t G.G\right) + \alpha} \quad (59)$$

$$\text{de solution : } \vec{p}_{MCO} = \left({}^t G.G + \alpha.Id\right)^{-1} . {}^t G.\vec{w} \quad (60)$$

Si α est petit par rapport à la plus grande valeur singulière de ${}^t G.G$, cette dernière n'est pratiquement pas modifiée par l'ajout de la régularisation. Par contre, la plus petite valeur singulière, proche de zéro en cas de problème instable, est, elle, significativement augmentée par l'ajout de α .

Le choix d' α est délicat :

- si α est trop petit : la régularisation ne sera pas suffisante, et le problème sera encore instable,
- si α est trop grand : on ne cherche plus à résoudre le problème inverse initial, mais uniquement à avoir une solution la plus proche possible de p_0 .

Décrivons une des méthodes utilisable pour choisir α : la « courbe en L ». Elle consiste à tracer l'écart entre la mesure et le modèle $\|\vec{w} - G.\vec{p}\|$ en fonction de l'écart entre la solution et la solution de référence $\|\vec{p} - \vec{p}_0\|$, et ce en faisant varier le paramètre α . Cette courbe a classiquement une forme de « L », et il est recommandé de choisir l' α qui se trouve à la cassure du L : on a alors un compromis entre « bien expliquer la mesure avec le modèle » et « stabiliser suffisamment le problème ».

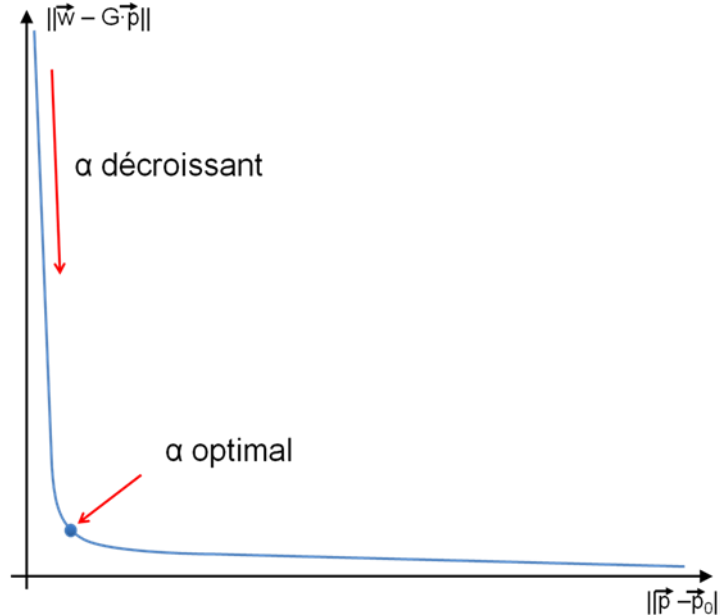


Figure 66 – Courbe en L théorique et choix d' α optimal

VI.3.b.2 Régularisation par troncature de spectre

La régularisation par troncature de spectre s'appuie sur la Décomposition en Valeurs Singulières (=SVD) de G . Dans le cas où G est rectangulaire de dimensions $\langle q \times n \rangle$ avec $q > n$, ou carrée de dimensions $\langle n \times n \rangle$, on peut l'écrire sous la forme :

$$G = U.S.^t.V \quad (61)$$

Avec U une matrice orthogonale de même dimension que G : $^tU.U = Id$, V une matrice carrée de taille $\langle n \times n \rangle$, et orthogonale : $^tV.V = V.^tV = Id$, et S une matrice carrée de taille $\langle n \times n \rangle$, et diagonale composée des valeurs singulières de G , classées par ordre décroissant.

La solution du problème des moindres carrés s'écrit alors :

$$\vec{p}_{MCO} = V.S^{-1}.^tU.^t\vec{w} \quad (62)$$

Au lieu de prendre toutes les n valeurs singulières de G , même celles qui sont proches de 0 et qui entraînent un mauvais conditionnement, on se limite à un certain nombre $k < n$, de façon à ne garder que les valeurs singulières grandes, donc entraînant un bon conditionnement. On enlève donc les $(n-k)$ dernières valeurs des matrices V , S , et U lors du calcul de p .

Le choix de k est également délicat :

- si k est trop grand : la régularisation ne sera pas suffisante, et le problème sera encore instable,
- si k est trop petit : la solution trouvée n'aura a priori rien à avoir avec la solution qui a réellement causé les effets mesurés.

Nous avons parcouru les caractéristiques principales des problèmes inverses linéaires, ainsi que les façons d'améliorer un problème inverse linéaire mal posé. Voyons à présent comment sont traités les problèmes inverses non linéaires.

VI.3.c Résoudre un problème inverse non linéaire

Pour résoudre un problème inverse non linéaire et être sûr d'obtenir au moins une solution, on passe également par un problème des moindres carrés. Il est défini par une fonction « Coût », qui calcule l'écart entre la mesure w et le modèle w_{mod} , écart que l'on cherche à minimiser :

$$\min(\text{Coût}(\vec{p})) = \min(\|\vec{w} - \vec{w}_{\text{mod}}(\vec{p})\|^2) = \min\left(^t(\vec{w} - \vec{w}_{\text{mod}}(\vec{p}))(\vec{w} - \vec{w}_{\text{mod}}(\vec{p}))\right) \quad (63)$$

La solution p_{MCO} est celle qui obtient le coût minimal :

$$\vec{p}_{MCO} = \arg \min(\text{Coût}(\vec{p})) \quad (64)$$

w_{mod} dépend d'un nombre n de paramètres inconnus regroupés dans le vecteur colonne p : par exemple, dans le cas de la modélisation d'un seul dipôle, p comprend les trois paramètres du vecteur m des moments magnétiques du dipôle, et des trois paramètres de la position d du dipôle.

Minimiser la fonction coût se fait à l'aide d'algorithmes d'optimisation. Ils reposent sur une technique itérative, qui va partir d'une initialisation des inconnues, puis va chercher le minimum de la fonction coût, via des méthodes « de descente » vers ce minimum. Au point minimum, les dérivées partielles premières de la fonction coût par rapport à chacun des paramètres seront nulles, mais c'est également le cas au point maximum. Pour les distinguer, il faut calculer les dérivées partielles secondes : elles seront positives dans le cas d'un minimum, et négatives dans le cas d'un maximum.

Si au moins une solution existe, elle n'est cependant pas forcément unique. Outre l'éventuelle sous-détermination du problème inverse, commune aux problèmes inverses linéaires, la complexité de la fonction coût entre ici en jeu. La sous-détermination peut être contrebalancée en fixant un certain nombre d'inconnues (ou en définissant des bornes sur les variables), donc en contraignant les solutions : dans le cas d'une distribution de dipôles, il peut s'agir de limiter leur nombre, ou l'orientation du vecteur des moments magnétiques. Il est plus difficile de s'affranchir d'une fonction coût complexe.

Une fonction coût convexe sera simple, car il n'y aura pas de distinction entre minimum local et minimum global. Une fonction coût non convexe pourra par contre posséder plusieurs minima locaux, vers lesquels l'algorithme d'optimisation est susceptible de converger en fonction de l'initialisation choisie, plutôt que de converger vers le minimum global.

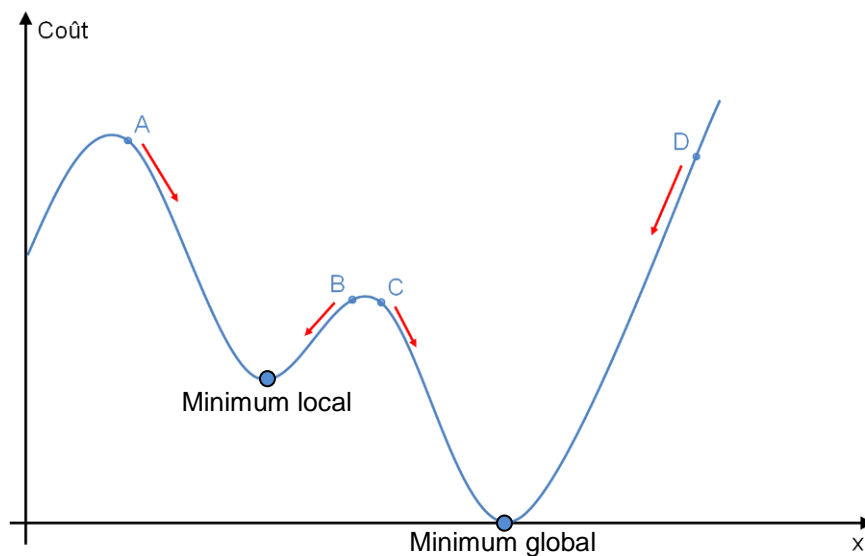


Figure 67 – Piège du minimum local de la fonction coût : une descente de la fonction coût à partir de l'initialisation A ou B tombera dans un minimum local, alors qu'une initialisation en C ou D atteindra le minimum global

Pour éviter les minima locaux, il sera judicieux de choisir une initialisation aussi proche que possible de la solution attendue (en s'aidant des connaissances a priori). De plus, plusieurs lancements de l'algorithme d'optimisation avec différentes initialisations augmenteront les chances de trouver le minimum global de la fonction coût.

La sensibilité de la fonction coût aux valeurs des différents paramètres est également un point important : si une grande plage de valeurs d'un paramètre donné obtient la même évaluation du coût, alors la fonction coût sera très plate, donc aura des dérivées premières et secondes par rapport à ce paramètre très proches de zéro.

Pour exprimer les méthodes de calcul de résolution des problèmes inverses non linéaires, il faut utiliser les notions de gradient, de matrice jacobienne, et de matrice hessienne. Les deux premières sont liées aux dérivées partielles du 1^{er} ordre de la fonction f . Dans le cas du gradient, la fonction f est à valeurs dans \mathbb{R} . Dans le cas de la matrice Jacobienne J , la fonction f est à valeurs dans \mathbb{R}^p .

$$\overrightarrow{\text{grad}}(f(\vec{x})) = \vec{\nabla}(f(\vec{x})) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(\vec{x})}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f(\vec{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (65)$$

$$J(f(\vec{x})) = J(f_1(\vec{x}), \dots, f_p(\vec{x})) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\vec{x})}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1(\vec{x})}{\partial x_n} \\ \vdots & \frac{\partial f_i(\vec{x})}{\partial x_j} & \vdots \\ \frac{\partial f_p(\vec{x})}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_p(\vec{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (66)$$

Les dérivées partielles du 2^{ème} ordre d'une fonction f à valeurs dans \mathbb{R} sont elles regroupées au sein de la matrice Hessienne :

$$H(f(\vec{x})) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(\vec{x})}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f(\vec{x})}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f(\vec{x})}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f(\vec{x})}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f(\vec{x})}{\partial x_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f(\vec{x})}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f(\vec{x})}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f(\vec{x})}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f(\vec{x})}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \quad (67)$$

Un minimum correspond à un gradient nul, et à une matrice Hessienne définie positive.

Présentons à présent les principaux algorithmes d'optimisation qui permettent de résoudre un problème inverse non linéaire.

Une 1^{ère} famille de méthodes ne s'appuie que sur la valeur du gradient de la fonction Coût pour descendre vers son minimum : ce sont les méthodes du 1^{er} ordre. La plus connue est l'algorithme du gradient, ou algorithme de la plus forte pente. A chaque itération, l'algorithme se dirige dans le sens opposé au gradient :

$$\vec{p}_{k+1} = \vec{p}_k - \lambda_k \cdot \vec{\nabla}(\text{Coût}(\vec{p}_k)), \lambda_k > 0 \quad (68)$$

Le principal avantage de ces méthodes est la rapidité de calcul de chaque itération, mais leur principal inconvénient est leur convergence trop lente.

Une 2^{ème} famille de méthodes s'appuie alors également sur la valeur de la matrice Hessienne : ce sont les méthodes du 2^{ème} ordre. Les plus connues sont la méthode de Newton, l'algorithme de Gauss-Newton, et l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

La plus ancienne est la méthode de Newton qui, comme pour l'algorithme du gradient, cherche itérativement à atteindre les paramètres dont le gradient de la fonction Coût est nul. Pour accélérer la convergence, le gradient est pondéré par l'inverse de la matrice Hessienne. En effet, au voisinage de ces paramètres, le gradient peut être approché à l'aide du développement en série de Taylor au 1^{er} ordre. On montre alors qu'à chaque itération, on passe des paramètres p_k aux paramètres p_{k+1} de la façon suivante :

$$\vec{p}_{k+1} = \vec{p}_k + [H(\text{Coût}(\vec{p}_k))]^{-1} \cdot \vec{\nabla}(\text{Coût}(\vec{p}_k)) \quad (69)$$

Cet algorithme a l'avantage de converger rapidement au voisinage du minimum, mais il nécessite que la matrice Hessienne soit inversible, et calcule en plus le hessien à chaque itération.

L'algorithme de Gauss-Newton s'appuie sur le fait que la fonction Coût soit une fonction au carré. Ainsi, son gradient s'écrit :

$$\vec{\nabla}(\text{Coût}(\vec{p})) = -2 \cdot {}^t J(\vec{w}_{\text{mod}}(\vec{p})) \cdot (\vec{w} - \vec{w}_{\text{mod}}(\vec{p})) \quad (70)$$

Et de là, une approximation au 1^{er} ordre de sa matrice Hessienne au voisinage du minimum s'écrit :

$$H(\text{Coût}(\vec{p})) \approx 2 \cdot {}^t J(\vec{w}_{\text{mod}}(\vec{p})) \cdot J(\vec{w}_{\text{mod}}(\vec{p})) \quad (71)$$

En remplaçant ces approximations dans l'expression du passage des paramètres p_k aux paramètres p_{k+1} dans l'algorithme de Newton, on obtient la nouvelle expression suivante :

$$\vec{p}_{k+1} = \vec{p}_k + \lambda_k \cdot [{}^t J(\vec{w}_{\text{mod}}(\vec{p}_k)) \cdot J(\vec{w}_{\text{mod}}(\vec{p}_k))]^{-1} \cdot {}^t J(\vec{w}_{\text{mod}}(\vec{p}_k)) \cdot (\vec{w} - \vec{w}_{\text{mod}}(\vec{p}_k)) \quad (72)$$

L'intérêt de cette méthode est qu'elle permet d'estimer les dérivées secondes à partir des dérivées premières : il n'est donc pas nécessaire de calculer exactement les dérivées secondes à chaque itération. La rapidité de calcul de chaque itération est alors comparable à celle de l'algorithme du gradient. Cependant, comme pour les problèmes inverses linéaires, l'algorithme de Gauss-Newton repose sur l'inversion d'un produit de matrices ${}^t J \cdot J$ qui peut avoir un très mauvais conditionnement, dans le cas où le problème inverse est instable.

Pour améliorer la stabilité du problème inverse non linéaire, on peut également s'appuyer sur une régularisation, comme celle de Tikhonov. C'est ce qui est appliqué dans l'algorithme de Levenberg-Marquardt. Le calcul de chaque itération devient alors :

$$\vec{p}_{k+1} = \vec{p}_k + \lambda_k \cdot [{}^t J(\vec{w}_{\text{mod}}(\vec{p}_k)) \cdot J(\vec{w}_{\text{mod}}(\vec{p}_k)) + \alpha_k \cdot Id]^{-1} \cdot {}^t J(\vec{w}_{\text{mod}}(\vec{p}_k)) \cdot (\vec{w} - \vec{w}_{\text{mod}}(\vec{p}_k)) \quad (73)$$

En fonction de la valeur de α_k , l'algorithme de Levenberg-Marquardt permet de choisir un comportement d'algorithme de Gauss-Newton, si α_k est petit, ou d'algorithme du gradient, si α_k est grand. Il est recommandé de commencer avec un grand α , qui permet de gérer les cas où la fonction coût diminue très peu, voire augmente, entre deux itérations. Au fur et à mesure des itérations, on peut ensuite diminuer α , surtout si la fonction coût diminue beaucoup entre deux itérations.

Le temps de chaque itération de l'algorithme de Levenberg-Marquardt est plus long que pour l'algorithme de Gauss-Newton. Il est donc préférable de limiter son utilisation aux cas où le nombre d'inconnues est faible.

Après avoir introduit les problèmes inverses, nous proposons dans le paragraphe suivant un état de l'art des différentes méthodes utilisées pour modéliser des objets magnétiques par une distribution de dipôles.

VI.4 Etat de l’art – modélisation d’objets magnétiques par une distribution de dipôles

Nous examinons ici le problème inverse suivant : comment remonter à la distribution de dipôles modélisant des objets magnétiques à partir de champs magnétiques mesurés par un ou plusieurs capteurs ?

L’objectif de ce paragraphe est d’étudier comment ce problème inverse a été précédemment résolu. Plusieurs critères nous intéressent :

- Nombre et type de dipôles utilisés pour modéliser l’objet magnétique : On s’attend à ce que ce nombre dépende de la distance à laquelle le ou les capteurs sont placés par rapport à l’objet. Si une grande distance permet de modéliser un objet avec un unique dipôle, elle entraîne toutefois la mesure d’un champ dipolaire très faible par rapport au champ magnétique local. Les auteurs ont ensuite pu chercher ou non à distinguer les moments induits des moments permanents (ce qui multiplie par deux le nombre d’inconnues), ce qui est une information toujours utile pour savoir si les performances de la ré-identification vont être très impactées par les changements d’orientation.
- Qualité et quantité de capteurs à disposition : Les auteurs ont pu utiliser des capteurs mesurant uniquement l’amplitude du champ magnétique (appelés « capteurs scalaires »), ou des capteurs monodimensionnels ou tridimensionnels. Des contraintes plus ou moins fortes peuvent être imposées sur le nombre de capteurs et leurs positions par rapport à l’objet.
- Contraintes et connaissances a priori sur la distribution de dipôles : Est-ce que les auteurs ont privilégié un problème inverse linéaire, en fixant certains paramètres, comme la position des dipôles ? Ou ont-ils laissé libre cette position, en résolvant un problème inverse non linéaire ? Avaient-ils des connaissances physiques sur l’objet permettant de simplifier le problème ?
- Méthodes de résolution du problème inverse choisies : Les auteurs ont pu avoir le choix entre plusieurs algorithmes de résolution. Il est donc intéressant de regarder quels algorithmes ont été choisis, et si possible de déterminer pourquoi.

Le nombre d’inconnues et le caractère mal posé du problème augmentant très rapidement avec le nombre de dipôles, nous avons distingué les travaux effectués sur les distributions à un dipôle des distributions à plusieurs dipôles.

Un tableau récapitulatif des différents critères en fonction des références citées sera proposé en fin de partie (§ VI.4.e).

VI.4.a Un unique dipôle sans distinction induit / permanent

Etudions d’abord les travaux où un objet magnétique est modélisé par un seul dipôle, sans faire de distinction entre la part du moment magnétique induite par le champ magnétique terrestre, et sa part permanente. Le paragraphe suivant (VI.4.b) exposera les travaux où les parts induites et permanentes du dipôle ont été distinguées.

Modéliser un véhicule par un seul dipôle à partir de la mesure d’un seul capteur se fait très souvent en s’appuyant sur une base orthonormée de trois fonctions, appelée « base d’Anderson », et

présentée ci-dessous. Nous n'avons trouvé qu'une seule référence qui ne l'évoque pas : il s'agit de [MAR78], présenté précédemment (paragraphe VI.2.b).

L'approche faisant appel à une base d'Anderson a particulièrement été utilisée dans le domaine militaire, dans des applications de détection et localisation [LOA76, BLA79, QUI89, CAR95], voire identification [CAR96] de véhicules terrestres (tels les tanks), marins ou sous-marins.

Le dipôle est alors situé à une grande distance du capteur et le principal problème consiste à réussir à extraire le signal dipolaire du bruit. Projeter le signal mesuré sur la base d'Anderson permet ainsi de réaliser un filtrage adapté qui permet de mettre en évidence la présence d'un dipôle, et donc d'un véhicule. Notons que le mouvement rectiligne uniforme du dipôle par rapport au capteur peut provenir soit d'un mouvement du dipôle mesuré par un capteur fixe, soit d'un mouvement du capteur par rapport à un dipôle immobile (cas d'un avion survolant un navire ou un sous-marin par exemple).

Dans le cas des applications de détection et de localisation, c'est la position du dipôle seule qui est recherchée, et en particulier son « point d'approche le plus proche » (en anglais : « Closest Point of Approach », abrégé en CPA), i.e. la position où il se trouve à distance minimale du capteur.

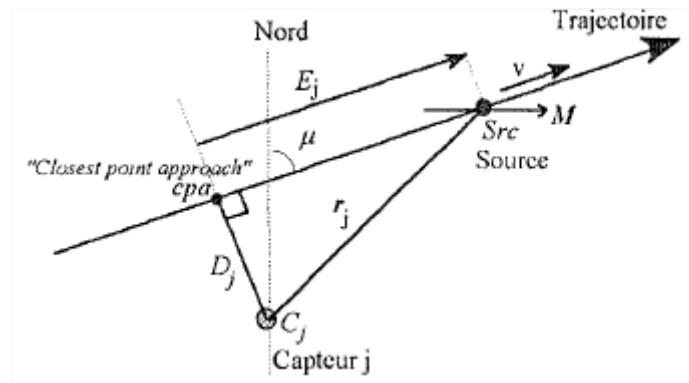


Figure 68 – Représentation en deux dimensions du CPA dans la trajectoire d'une « Source » (véhicule modélisé par un dipôle) par rapport à un capteur [CAR95]

Pour déterminer le CPA, ils s'appuient sur un unique capteur scalaire mesurant l'amplitude du champ magnétique [LOA76, BLA79], ou d'un unique capteur tridimensionnel [QUI89]. Dans [CAR95], c'est un réseau de trois capteurs d'amplitude qui est utilisé pour remonter à la trajectoire du véhicule. Dans [CAR96], ce même réseau d'au moins trois capteurs est utilisé pour une application d'identification de véhicules militaires, en recherchant le moment magnétique du dipôle en plus de sa trajectoire.

Présentons les fonctions d'Anderson dans le cas d'un capteur scalaire. Le dipôle étant mesuré à une grande distance, l'amplitude du champ qu'il génère est bien moindre de celle du champ terrestre. Une approximation au 1^{er} ordre de la mesure correspond alors à la somme de l'amplitude du champ magnétique terrestre (B_{ter} sur la figure ci-dessous) avec la projection du champ du dipôle (B_{var} sur la figure ci-dessous) sur l'axe du champ terrestre (u_t sur la figure ci-dessous) [MCF90, CAR96].

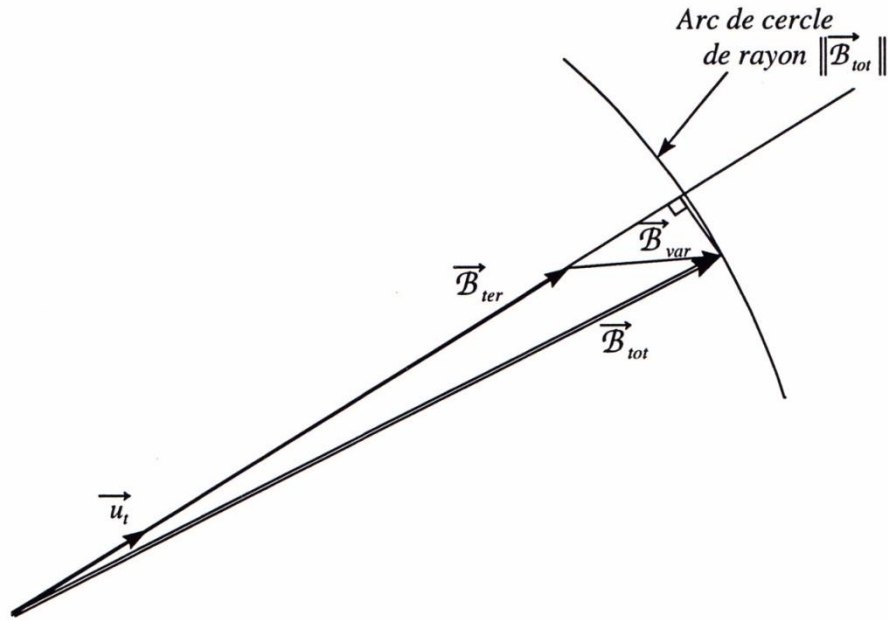


Figure 69 – Approximation de l’amplitude mesurée par un capteur scalaire : l’amplitude de B_{tot} vaut pratiquement la somme de l’amplitude de B_{ter} avec la projection de B_{var} sur B_{ter} [CAR96]

L’amplitude de la projection peut s’exprimer comme une combinaison linéaire de trois fonctions e_0 , e_1 , et e_2 , formant une base orthonormée dite « d’Anderson ». Ces fonctions dépendent de la vitesse v de passage du véhicule, de la distance D entre le capteur et le CPA, et du temps t (K_0 , K_1 et K_2 étant des constantes) :

$$e_0(v.t/D) = K_0 \cdot \frac{1}{(1 + (v.t/D)^2)^{5/2}} \quad (74)$$

$$e_1(v.t/D) = K_1 \cdot \frac{v.t/D}{(1 + (v.t/D)^2)^{5/2}} \quad (75)$$

$$e_2(v.t/D) = K_2 \cdot \frac{1 - 7(v.t/D)^2}{(1 + (v.t/D)^2)^{5/2}} \quad (76)$$

Ce qui donne les représentations suivantes en fonction de la variable $v.t/D$:

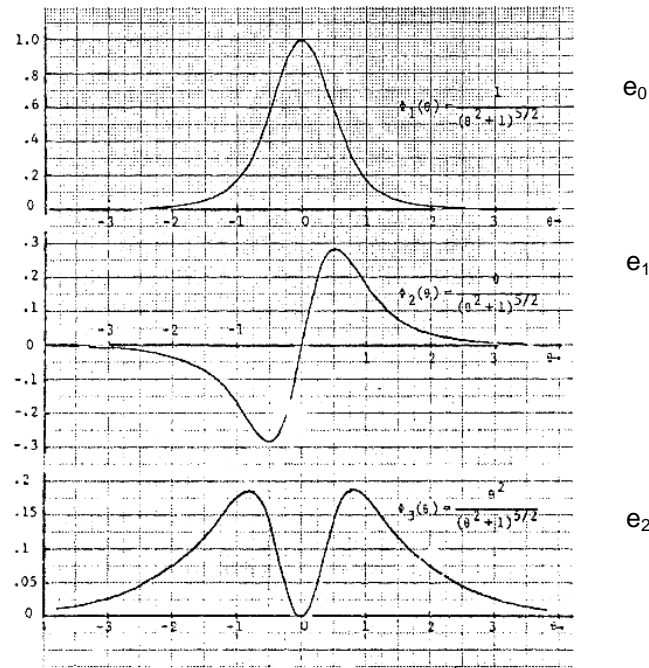


Figure 70 – Représentation des trois fonctions de la base d'Anderson [LOA76]

La distance D et la vitesse v n'étant pas connues a priori, les trois fonctions de la base d'Anderson sont calculées pour différentes valeurs de ces paramètres, comprises dans un intervalle correspondant à l'application visée (distances et vitesses minimales et maximales attendues pour les véhicules détectés). Les auteurs cherchent ensuite les paramètres D et v qui correspondent le mieux à leurs mesures par projection sur les fonctions de la base.

Une base d'Anderson composée cette fois de quatre fonctions peut également être définie pour un couple de deux capteurs appelé « gradient-mètre ». Ces deux capteurs sont suffisamment proches l'un de l'autre par rapport à la taille du dipôle pour que la soustraction des deux champs mesurés puisse être considérée comme une approximation valable du gradient du champ magnétique qu'il génère. Le principal avantage de l'utilisation d'un gradient-mètre est la meilleure réduction du bruit qu'il permet grâce à la soustraction des deux capteurs, supposés mesurer le même champ magnétique local (en grande majorité le champ magnétique terrestre), auquel s'additionne le champ dû au passage du dipôle. Toutefois, manipuler le gradient du champ a l'inconvénient de travailler sur des signaux qui décroissent en $1/r^4$, donc qui ne peuvent être détectés qu'à une distance plus faible que pour les signaux dipolaires qui décroissent en $1/r^3$. De plus, l'utilisation d'un gradient-mètre n'est pas adaptée quand on est proche du dipôle car son gradient varie trop vite pour que l'approximation par la soustraction des deux capteurs soit valable [MCF81].

D'autres approches ont été proposées pour remonter à la distribution de dipôles, en ayant à disposition au moins un capteur. Distinguons celles où il y a autant de mesures que d'inconnues [MCA77, FLA95, MER03], et celles où il y a plus de mesures que d'inconnues, donc où l'on résout un problème surdéterminé [MCA77, MCF81, MCF90, MER03, WAH10].

[MCA77, FLA95] ont utilisé des capteurs scalaires pour résoudre ce problème inverse. Chaque capteur n'apportant qu'une seule information, il faut alors autant de capteurs que d'inconnues. L'objectif de [FLA95] est de déterminer le dipôle équivalent au véhicule, en distinguant si possible

l’induit et le permanent, probablement en amont d’une application de détection de véhicules militaires. Ils se placent dans le cas où la position du véhicule et donc du dipôle est connue. Ils cherchent donc à résoudre un problème inverse linéaire à trois inconnues : m_x , m_y , et m_z . Ils positionnent alors trois capteurs autour du véhicule, dans le même plan que le véhicule, et dans un cercle de rayon 10 ou 20 mètres :

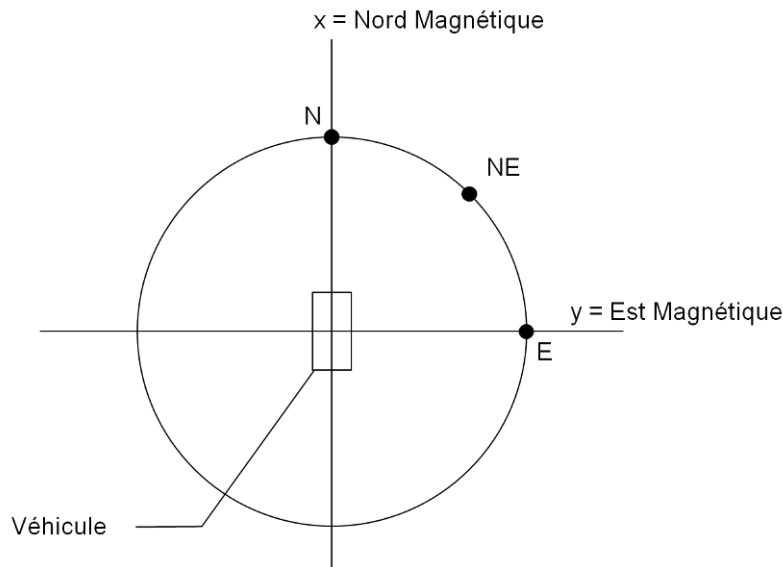


Figure 71 – Disposition des capteurs autour du véhicule [FLA95]

Le problème est résolu en inversant la matrice qui relie les moments magnétiques aux mesures.

L’application de [MCA77] consiste à survoler un sous-marin (mobile ou immobile) avec un avion auquel les capteurs sont accrochés, dans le but de localiser le sous-marin (détermination de sa profondeur, et si possible de son orientation). Ils se placent donc dans le cas où la position du dipôle est inconnue, ce qui correspond à un problème inverse non linéaire. Ils recherchent la position tridimensionnelle du dipôle, ainsi que son orientation par rapport au Nord, soit quatre inconnues en tout. Ils n’ont par contre que deux capteurs d’amplitude à disposition car ils sont limités à ceux accrochés à l’avion. Pour obtenir les quatre mesures minimum nécessaires pour résoudre le problème à quatre inconnues, ils déplacent l’avion en mouvement rectiligne uniforme et utilisent donc des mesures réalisées à des instants différents.

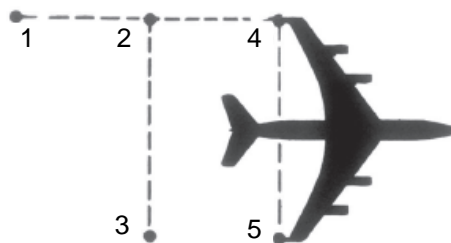


Figure 72 – Disposition des points de mesures : exemple avec 5 mesures réalisées en 3 instants différents [MCA77]

Le problème est résolu via l’algorithme de Newton (appelé ici Newton-Raphson).

[MER03] résout un problème assez similaire à [MCA77], mais avec un réseau de capteurs tridimensionnels immobiles au bord de la route. Dans cette application de détection de chars, l'objectif est de trouver à la fois la position et le moment magnétique selon X, Y et Z du dipôle, sans fixer de contraintes sur la position ou le moment, en dehors d'une non-variation de m pendant le temps de la mesure. Cela représente donc 6 inconnues en tout, au sein d'un problème non linéaire. Six mesures sont nécessaires pour obtenir au moins une solution, dont l'unicité n'est pas garantie. [MER03] les obtient à l'aide de deux capteurs, puis résout le problème inverse à l'aide de l'algorithme de Newton. Pour faciliter la convergence, les capteurs sont espacés de 10 à 30m. [MER03] explique que quatre solutions sont en fait possibles lors de la résolution du problème, en fonction de l'initialisation choisie. Des connaissances a priori sont alors nécessaires pour choisir la bonne solution.

Toutefois, [MER03] confirme que ces méthodes de résolution sont très sensibles au bruit. Il est alors tentant de se placer dans un problème surdéterminé, avec plus de mesures que d'inconnues, même si cela risque d'entraîner des contradictions entre les mesures.

Toutes les références trouvées se placent alors dans un problème non linéaire où la position du dipôle est inconnue, ce qui représente 6 inconnues en tout [MCA77, MCF81, MCF90, MER03, WAH10]. La majorité des références utilisent l'algorithme d'optimisation numérique de Levenberg-Marquardt pour minimiser une erreur des moindres carrés entre le champ magnétique mesuré et le champ magnétique modélisé. [WAH10] seul a utilisé l'algorithme de Gauss-Newton dans une application de suivi de la position de véhicules en mouvement.

[MCA77] et [MER03], présentés précédemment, font partie de ces références. Les types et configurations de capteurs utilisés varient :

- Deux capteurs d'amplitude déplacés en plus de trois points de mesure [MCA77],
- Grille plane d'au moins six capteurs monodimensionnels sur l'axe vertical Z [MCF81] (applications de détection et identification d'objets enterrés (mines) ou de sous-marins),
- Au moins deux capteurs tridimensionnels [MER03, WAH10],
- Fusions de données de capteurs d'amplitude, monodimensionnels sur l'axe vertical, et gradient-mètre, tous situés dans un plan horizontal [MCF90] (application de détection et identification de véhicules).

[MER03] observe une amélioration des résultats en passant de trois à cinq capteurs : l'erreur sur la position du dipôle passe de 5m à 1m (sur une distance de l'ordre de 50m, donc on passe de 10% à 2% d'erreur relative), et l'erreur sur les moments magnétiques passe de 1000 A.m² à 200 A.m² (sans préciser l'ordre de grandeur des moments magnétiques). [MCF81, MCF90, MER03] notent toutefois que l'algorithme de Levenberg-Marquardt, s'il présente un bon compromis entre rapidité de convergence et pertinence de la solution trouvée, est sensible aux minima locaux de la fonction d'erreur. Pour faciliter la convergence vers le bon minimum, il est important d'avoir une bonne initialisation.

Enfin, [MCF90] propose une méthode pour résoudre le problème inverse étape par étape, en se plaçant dans un cas particulier qui facilite le calcul d'une des inconnues, puis en en déduisant une à une chaque inconnue. Le réseau de capteurs choisi est un maillage assez fin du plan horizontal par des capteurs monodimensionnels sur l'axe vertical Z : cela permet de connaître B_z max et B_z min générés par le dipôle. Le maillage du plan se fait d'abord grossièrement, puis plus finement dans les

zones ayant été détectées comme étant celles des minimum et maximum. Le dipôle est de plus supposé uniquement induit, donc avec une composante m_y nulle. Avec ces hypothèses, [MCF90] déduit l’angle de rotation entre l’axe X du capteur et l’axe X du dipôle, et le ratio entre m_x et m_z , ce qui permet de déduire la position du dipôle sur l’axe vertical, puis sur les axes longitudinal et latéral, puis enfin l’amplitude de m .

Cet état de l’art des méthodes de modélisation d’un objet magnétique avec un seul dipôle confirme que cette modélisation n’est valable qu’à une distance suffisamment grande de l’objet, ce qui n’est pas le cas de nos mesures. Voyons tout de même à présent dans le paragraphe suivant comment les parts induites et permanentes du dipôle ont pu être distinguées.

VI.4.b Un unique dipôle avec distinction induit / permanent

Dans plusieurs travaux [ALT93, FLA95, MER03], les méthodes de résolution de problème inverse ont été utilisées pour remonter non seulement au moment magnétique total, mais également pour distinguer le moment induit du moment permanent (équation (45)). On cherche alors à déterminer quelle part du moment magnétique du dipôle varie en fonction de son orientation par rapport au champ magnétique terrestre B_{Ter} (moment induit m_{ind}), et quelle part est indépendante de cette orientation (moment permanent m_{perm}).

Le champ magnétique induit B_{ind} et le champ magnétique permanent B_{perm} exprimés pour plusieurs dipôles aux équations (46) et (47) se simplifient pour un dipôle en :

$$\vec{B} = \vec{B}_{ind}(\vec{B}_{Ter}) + \vec{B}_{perm} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{3(\vec{m}_{ind}(\vec{B}_{Ter}) \cdot \vec{r})\vec{r}}{\|\vec{r}\|^5} - \frac{\vec{m}_{ind}(\vec{B}_{Ter})}{\|\vec{r}\|^3} \right) + \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{3(\vec{m}_{perm} \cdot \vec{r})\vec{r}}{\|\vec{r}\|^5} - \frac{\vec{m}_{perm}}{\|\vec{r}\|^3} \right) \quad (77)$$

m_{ind} est relié à B_{ter} par une matrice des susceptibilités Q :

$$\vec{m}_{ind} = Q \cdot \vec{B}_{Ter} \quad (78)$$

Notons que nous avons précédemment relié M à H via une susceptibilité χ (équation (7)). M est reliée à m par l’équation (3), et B à H par l’équation (1), donc Q peut être également reliée à χ (produit de vol par χ divisé par μ_0).

Deux grandes approches sont proposées. La 1^{ère} est plus mathématique : elle consiste à traiter de façon égale tous les coefficients induits (9 éléments de Q) et permanents (3 valeurs m_{xperm} , m_{yperm} , m_{zperm}), et elle nécessite beaucoup de mesures sur une trajectoire complexe de l’objet [FLA95, MER03]. La 2^{nde} est plus physique : elle s’appuie sur des connaissances a priori de la géométrie et du matériau de l’objet pour en déduire son moment induit, afin de n’avoir plus qu’à déterminer le moment permanent à partir des mesures [ALT93].

L’approche mathématique nécessite que la trajectoire du véhicule comporte un virage (ou lacet, rotation autour de l’axe Z vertical), pour séparer les moments induits et permanents des axes X et Y horizontaux, et une pente (ou tangage, rotation autour de l’axe Y latéral), pour séparer les moments induits et permanents de l’axe Z latéral. Cette trajectoire doit de plus se faire dans un champ magnétique local uniforme et constant, et est supposée sans roulis (rotation autour de l’axe X longitudinal).

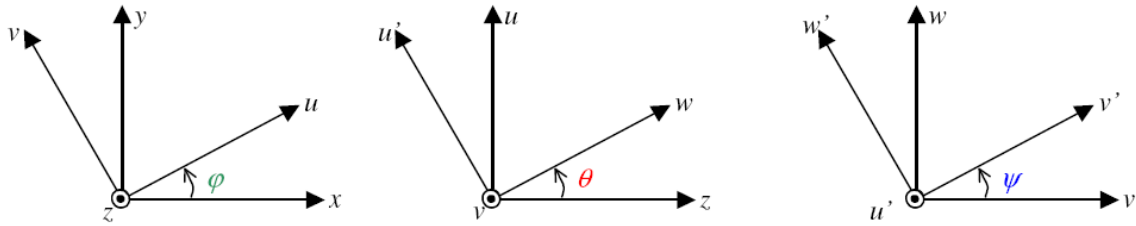


Figure 73 – Définition des angles φ de lacet autour de Z, θ de tangage autour de $Y' = v$, et ψ de roulis autour de $X'' = u'$, en cas de rotations successives autour des axes verticaux, latéraux, puis longitudinaux

Etant donné que la rotation autour de l'axe Y n'est pas évidente à obtenir tout en conservant un champ local constant, [FLA95] propose des hypothèses simplificatrices.

Si $m_{x_{ind}}$, $m_{y_{ind}}$, et $m_{z_{ind}}$ sont respectivement uniquement dus au champ magnétique local selon X, Y et Z, la matrice des susceptibilités Q est une matrice diagonale ($q_{ij}=0$ si $i \neq j$). De plus, si les coefficients qui relient respectivement $m_{x_{ind}}$ au champ selon X, $m_{y_{ind}}$ à celui selon Y, et $m_{z_{ind}}$ à celui selon Z sont égaux, alors tous les éléments de la diagonale de Q sont égaux ($q_{11}=q_{22}=q_{33}=q$). Il n'y a donc plus qu'un coefficient à déterminer pour caractériser le moment induit, donc 4 inconnues en tout : il est alors possible de calculer les moments induits et permanents selon X, Y et Z avec uniquement deux orientations différentes du véhicule par rapport au champ magnétique terrestre, sans rotation autour de Y.

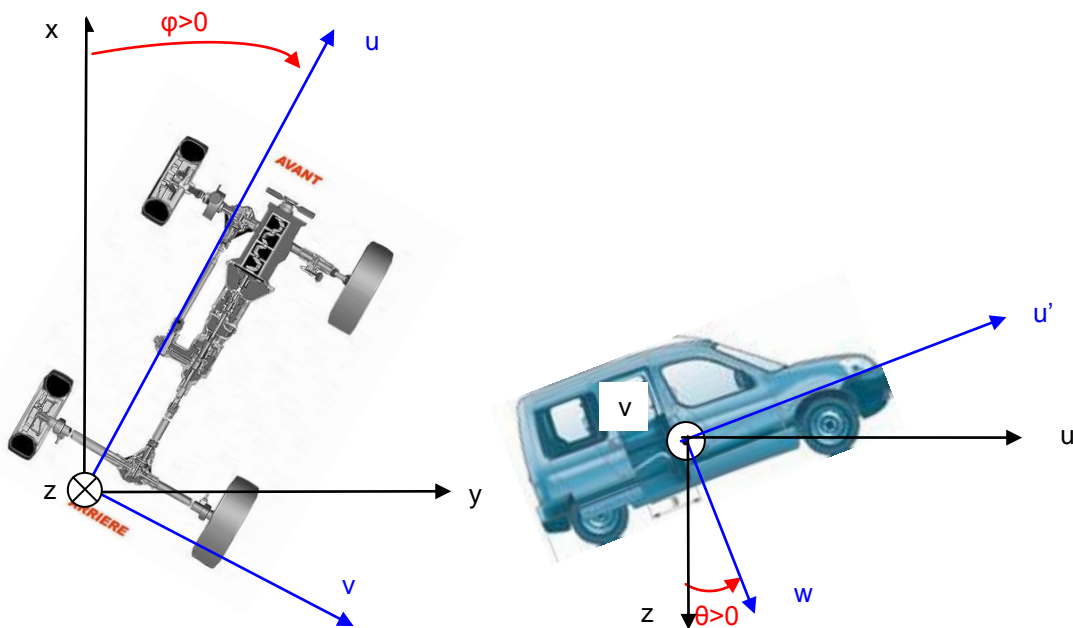


Figure 74 – Illustration d'un angle de lacet $\varphi > 0$ (rotation autour de l'axe Z vertical), puis d'un angle de tangage $\theta > 0$ (rotation autour de l'axe v latéral, pour un véhicule)

Connaissant la position du dipôle à modéliser, [FLA95] réutilise la méthode de résolution du problème inverse linéaire décrite précédemment, à savoir une inversion de la matrice G qui relie les mesures aux inconnues. Ne faisant pas d'hypothèse sur la position du dipôle, [MER03] réutilise la

méthode de résolution du problème inverse non linéaire évoquée précédemment, à savoir l’algorithme de Levenberg-Marquardt.

L’objectif d’ [ALT93] est de mieux connaître les propriétés magnétiques de véhicules militaires, dont l’aimantation est supposée uniforme dans tout le volume de l’objet. Le moment induit de l’objet magnétique est tout d’abord estimé en modélisant l’objet par un ellipsoïde dont les dimensions sont déterminées à vue d’œil.

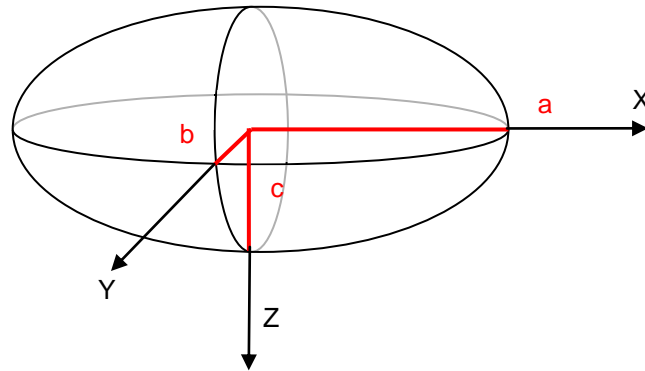


Figure 75 – Représentation des demi-axes a longitudinal, b latéral et c vertical d’un ellipsoïde

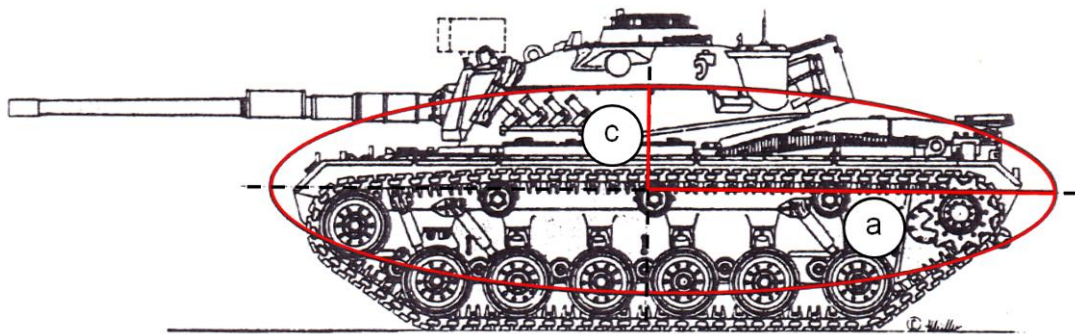


Figure 76 – Modélisation d’un tank par un ellipsoïde – Représentation des demi-axes a longitudinal et c vertical [ALT93]

L’ellipsoïde est un modèle souvent utilisé en magnétisme : en effet, son aimantation induite M_{ind} s’exprime comme le produit du champ magnétique local (supposé uniforme) et d’une matrice diagonale dont les coefficients peuvent être calculés à l’aide d’abaques si l’on connaît sa susceptibilité magnétique χ et les dimensions de ses demi-axes selon X , Y , Z .



Figure 77 – Modélisation d’un Citroën Berlingo par un ellipsoïde

A l'aide des caractéristiques magnétiques des matériaux du véhicule, [ALT93] estime la susceptibilité magnétique χ de l'ellipsoïde. L'aimantation induite de l'objet magnétique peut alors être elle-même déterminée, et on en déduit son moment magnétique induit (connaissant le volume de l'objet).

Le champ généré par cet ellipsoïde est comparé aux mesures de la signature magnétique du véhicule réalisées par un capteur d'amplitude et un capteur monodimensionnel (selon l'axe latéral Y) selon deux orientations par rapport au champ magnétique terrestre : Nord vers Sud et Sud vers Nord. Les auteurs en déduisent alors manuellement une estimation du moment permanent du véhicule, ainsi qu'une éventuelle correction du moment induit estimé à partir de l'ellipsoïde.

Pour clore ce paragraphe sur la modélisation d'objets magnétiques par un unique dipôle, penchons nous sur une méthode de séparation des moments induits et permanents qui ne peut s'appliquer qu'aux objets suffisamment petits pour être facilement tournés dans l'espace [BRE73, GRE07] : elle consiste à tourner l'objet sur lui-même, à 360°, selon trois plans orthogonaux. Dans le cas d'un objet magnétique de la taille d'un véhicule, il n'était pas possible d'effectuer autant de rotations, ni de connaître le champ magnétique terrestre local tridimensionnel en tout point d'une sphère de rayon une à deux longueurs du véhicule.

La position du dipôle est connue, et le problème est donc linéaire. Dans une application de détermination des propriétés magnétiques d'un échantillon de matériau (pierre), [BRE73] utilise un capteur d'amplitude, en alignant capteur et dipôle sur l'axe du champ magnétique terrestre. Dans une application de caractérisation du champ magnétique généré par un téléphone portable, [GRE07] utilise deux capteurs tridimensionnels, un qui sert de référence et qui mesure le champ magnétique terrestre local, et l'autre placé un peu plus proche de l'objet à étudier. Tous ces capteurs sont toutefois situés à une distance suffisante de l'objet pour le modéliser par un seul dipôle.

Même en effectuant ces rotations sur 360°, des hypothèses simplificatrices sont nécessaires pour calculer les moments induits et permanents : [BRE73] s'appuie sur sa connaissance de la géométrie et de la composition de l'objet pour estimer que la susceptibilité du matériau est identique sur tous les axes (susceptibilité isotrope). [GRE07] suppose de son côté que l'aimantation induite est faible. Il connaît de plus le champ magnétique terrestre local tridimensionnel à chaque point de mesure.

Comme [MCF90] par la suite, [BRE73] s'appuie sur les champs maximum et minimum mesurés lors des rotations de l'objet pour déduire l'amplitude du moment induit selon X, Y et Z, ainsi que celle du moment permanent. [GRE07] commence par déduire la part permanente en faisant la moyenne du champ mesuré lors des rotations. Les coefficients caractérisant la part induite sont alors calculés par inversion.

Ce premier état de l'art des méthodes utilisées pour modéliser un objet magnétique avec un seul dipôle montre que la grande majorité des auteurs se placent dans le cadre d'un problème inverse non linéaire. Il met également en évidence que même avec un seul dipôle, des problèmes de convergence vers la bonne solution peuvent exister. De plus, pour distinguer les moments induits des moments permanents, il faut faire faire à l'objet magnétique des trajectoires complexes, ou avoir une très bonne connaissance des caractéristiques magnétiques de l'objet (taille, matériaux).

Voyons à présent comment des objets magnétiques ont été modélisés par plusieurs dipôles.

VI.4.c Plusieurs dipôles sans distinction induit / permanent

La majorité des modélisations à plusieurs dipôles se place dans une résolution de problème inverse linéaire, où les positions r_{ij} des nombreux dipôles par rapport aux capteurs sont connues et où seuls les moments magnétiques m_i peuvent varier [FLA92, IGA00, LEG11].

Les seuls travaux où le problème inverse était non linéaire concernent des cas où les capteurs font le tour de l’objet à modéliser, et où les connaissances a priori des propriétés magnétiques de l’objet sont suffisantes pour initialiser la solution avec des valeurs proches des valeurs optimales. Intéressons-nous par exemple aux travaux récents de [LEG11] où une roue était modélisée par cinq dipôles dont la position n’était pas fixe.



Figure 78 – Modélisation d’une roue par cinq dipôles [LEG11]

Le problème est limité au plan de la roue, où l’on distingue deux axes, l’axe radial et l’axe orthoradial. Les positions et moments des dipôles sont supposés appartenir à ce plan également : il y a donc quatre inconnues par dipôle, soit vingt inconnues en tout. Un capteur bidimensionnel fait le tour de la roue, et sa fréquence d’échantillonnage définit le nombre de points de la signature de la roue.

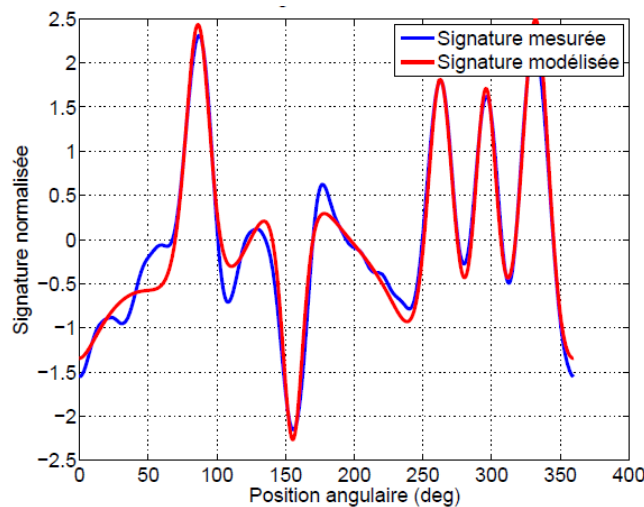


Figure 79 – Comparaison entre la signature modélisée et la signature mesurée sur la roue sur un des axes du capteur bidimensionnel [LEG11]

[LEG11] note qu'augmenter la fréquence d'échantillonnage du capteur ne permet pas d'augmenter la quantité d'information à l'infini : l'information apportée par un emplacement de capteur par rapport à l'objet à modéliser est limitée, et devient donc redondante.

Comme [WAH10], [LEG11] a utilisé l'algorithme de Gauss-Newton pour minimiser la fonction d'écart entre le champ magnétique modélisé et le champ magnétique mesuré. La position des cinq dipôles est initialisée grâce à une étude préliminaire qui a permis de déterminer où les dipôles étaient probablement situés. Cette étude est décrite ci-dessous et consiste à résoudre un problème inverse linéaire, où les dipôles sont fixes. L'initialisation choisie permet de limiter le piège des minima locaux, mais plusieurs lancements de l'algorithme sont malgré tout recommandés pour trouver la meilleure solution.

Dans la résolution d'un problème inverse non linéaire à plusieurs dipôles, des précautions sont donc prises pour faciliter la convergence de l'algorithme (initialisation proche de la solution, contraintes sur les dipôles). Voyons à présent comment sont résolus les problèmes inverses linéaires à plusieurs dipôles.

Tous les travaux reposent sur un maillage plus ou moins fin d'une surface ou d'un volume de l'objet à modéliser. Chaque maille correspond à un dipôle dont la position par rapport au capteur est connue (alternative : chaque arête de maille correspond à une charge, positive ou négative [LEG11]). [IGA00] cherche à modéliser une pièce aimantée d'une imprimante, pièce dont le champ magnétique contribue à déterminer la qualité de l'impression. Pour ce faire, il maille finement un disque par des triangles de tailles variables, puis de même taille. [LEG11] maille également finement un disque (la surface d'une roue) en le divisant en sections d'angle et de rayon variables. Les deux références supposent que le moment des dipôles est limité au plan de leur disque.

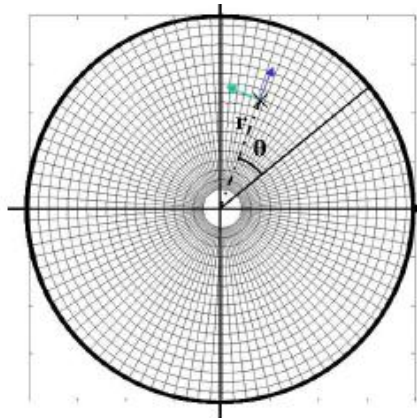


Figure 80 – Maillage extrêmement fin de la surface d'une roue [LEG11]

Le maillage le plus complexe est réalisé par [FLA92] sur un volume de sol marin : l'objectif est de modéliser ce sol, de façon à connaître le champ magnétique qu'il génère en tout point de la surface de l'eau. Le sol est maillé par des cubes contenant chacun un dipôle, dont l'orientation est fixée comme étant celle du champ magnétique terrestre (moment magnétique induit uniquement). Des règles sont établies pour construire le maillage du volume du sol, à partir des connaissances des fréquences maximales et encombrements spatiaux et spectraux des 3 fonctions de la base d'Anderson :

- Pour éviter les effets de bord, il faut que les dipôles dépassent la largeur du plan où l’on souhaite calculer les champs magnétiques générés par la distribution dipolaire (ce plan correspond à une « carte » en deux dimensions, ou carte 2D, des champs générés).
- La fréquence maximale spatiale d’un dipôle vaut l’inverse de sa distance r au capteur. La plus haute fréquence mesurée par le capteur fixe donc la distance r_{min} du dipôle le plus proche du capteur, et donc la hauteur de la 1^{ère} couche de dipôles du maillage.
- A l’inverse, le dipôle le plus éloigné du capteur doit expliquer les plus basses fréquences mesurées. Dans leur cas, la plus basse fréquence correspond à la variation linéaire du champ géologique en fonction du temps, et la couche de dipôles la plus éloignée doit alors se trouver à une distance $L/10$, L étant la plus grande dimension de la carte 2D du champ que l’on cherche à construire.
- Au sein d’une couche de dipôles donnée, et située à une distance minimale de h par rapport aux capteurs, les dipôles doivent être espacés au maximum de $h/2$. Cette règle est déduite de l’encombrement spatial minimum du champ généré par un dipôle.
- Enfin, l’espacement entre deux couches de dipôles est déterminé à l’aide des encombrements spectraux des couches, qui doivent être contigus. Dans leur cas, si une couche est située à une distance h des capteurs, alors la couche suivante doit être située à une distance $5 \cdot h$.

Les capteurs utilisés peuvent être des capteurs scalaires, ou des capteurs mono, ou bidimensionnels. [IGA00] et [LEG11] sont dans le cas favorable où les capteurs font le tour de l’objet à modéliser. [FLA92] ne mesure que le champ magnétique sur une surface située au-dessus du sol marin, ce qui est plus proche de nos mesures de signatures magnétiques de véhicules.

Dans tous les cas, le problème linéaire à résoudre possède plus d’inconnues que d’équations. Il est donc sous-déterminé, et a plusieurs solutions possibles. On cherche alors à minimiser l’écart entre la mesure et le champ modélisé par la distribution de dipôles en résolvant un problème des moindres carrés. Pour choisir une des solutions, une régularisation de Tikhonov est appliquée pour choisir la solution de norme minimale. Dans [IGA00] et [LEG11], la détermination du paramètre de régularisation se fait grâce à la méthode « L-curve », qui permet de déterminer le compromis entre « avoir une norme faible » et « avoir une faible erreur entre la mesure et le champ modélisé ».

Enfin, [LEG11] propose une approche supplémentaire pour résoudre ce problème inverse linéaire, qui s’appuie sur une base de deux fonctions d’Anderson. Pour chaque position de dipôle du maillage, on calcule les deux fonctions d’Anderson correspondant à un dipôle dont le moment est orienté radialement, et à un dipôle dont le moment est orienté ortho-radialement). On projette chaque fonction d’Anderson sur la signature de la roue, pour déterminer où les dipôles sont probablement situés. C’est cette méthode qu’il a utilisée pour initialiser l’algorithme de Gauss-Newton qui a permis de modéliser la roue avec cinq dipôles (problème inverse non linéaire).

Le paragraphe suivant décrit les modélisations effectuées avec plusieurs dipôles et en distinguant les moments induits des moments permanents.

VI.4.d Plusieurs dipôles avec distinction induit / permanent

Dans les modélisations à plusieurs dipôles, on trouve également des études destinées à distinguer la part de moments induits et la part de moments permanents. Comme dans les modélisations à un

seul dipôle, on retrouve des approches plus mathématiques [FON02], et des approches plus physiques [CHA01, CHA02].

La méthode décrite par [FON02] est un prolongement des méthodes de [FLA95] et [MER03] décrites précédemment pour le cas d'une modélisation à un dipôle. L'objet modélisé étant ici un avion, sa trajectoire comporte des lacets (rotations autour de l'axe Z vertical), des tangages (rotations autour de l'axe Y latéral) mais également des roulis (rotations autour de l'axe X longitudinal), le tout pour quatre orientations différentes par rapport au champ magnétique terrestre. Les angles entre le champ magnétique terrestre et le repère tri-axe attaché à l'avion sont supposés connus pour tous les points de mesure. Comme pour [GRE07], deux capteurs sont utilisés : un capteur scalaire de référence pour connaître le champ magnétique local non perturbé par l'objet, et un capteur pour mesurer les perturbations magnétiques dues à l'objet. L'avion est modélisé par deux dipôles situés au niveau des moteurs : leur position est donc connue, et le problème à résoudre est linéaire.

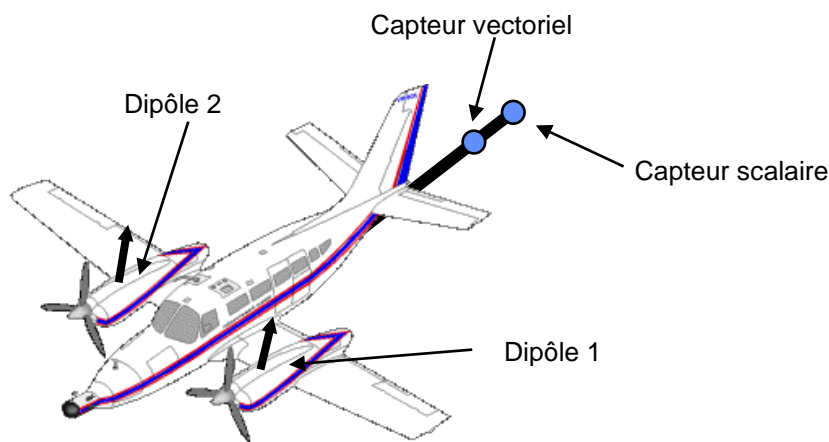


Figure 81 – Position des dipôles et des capteurs (espacés d'1m) par rapport à l'avion [FON02].

Etant donné que leur problème est mal-conditionné, ils utilisent une « régression ridge » similaire à la régularisation de Tikhonov.

L'approche de [CHA01, CHA02] est plus proche des autres méthodes de modélisation d'un objet magnétique par un grand nombre de dipôles. En effet, la coque du sous-marin qui est modélisé est découpée en un maillage fin (271 mailles), chaque maille correspondant à un dipôle. Une caractéristique physique du matériau dans lequel est fait le sous-marin permet de supposer que les dipôles sont uniquement orientés dans le plan tangentiel à la surface de la maille. Le problème linéaire a donc deux inconnues par maille. Le champ magnétique généré par la coque du sous-marin est mesuré par un grand nombre de capteurs tridimensionnels (32 capteurs) situés à l'intérieur du sous-marin, ce qui est moins favorable que [IGA00] et [LEG11] où l'on fait le tour de l'objet.

Le problème à résoudre possède beaucoup plus d'inconnues que d'équations : plusieurs solutions peuvent donc expliquer la mesure. Plutôt que d'appliquer une régularisation, ils préfèrent ajouter des connaissances physiques sur l'objet : connaissant sa géométrie, son matériau donc sa perméabilité, et le champ externe, ils peuvent déjà calculer ses moments induits. Avec cette connaissance a priori du système, ils améliorent le conditionnement et peuvent donc résoudre le problème inverse via une décomposition en valeurs singulières.

VI.4.e Récapitulatif

Après avoir parcouru cet état de l’art, nous avons souhaité récapituler pour chaque référence citée les critères évoqués en début de partie :

- Nombre de dipôles utilisés pour modéliser l’objet magnétique,
- Qualité et quantité des capteurs à disposition,
- Contraintes et connaissances a priori sur la distribution de dipôles,
- Méthodes de résolution du problème inverse choisi.

Les deux tableaux suivants présentent ce récapitulatif pour toutes les références évoquées : le 1^{er} présente les méthodes sans distinction des moments induits et permanents, et le 2^{ème} couvre les méthodes avec distinction des moments induits et permanents.

Réf érence	Nb de dipô les	Quantité et Qualité des capteurs					Contraintes sur les dipôles			Méthode de résolution		
		Scal aire	1D	2D	3D	Gra d.	Pb liné aire	Pb non-lin.	Contraintes sur les dipôles			
MAR78	1		1Bz				x		Position d connue + m _z seul → 1 inconnue (m _z)	Calcul manuel		
LOA76		1						x	/	Projection du champ mesuré sur une base d'Anderson	Déduisent le CPA	
BLA79		1						x	/			
CAR95		3						x	/			
QUI89					1			x	/			
CAR96		3						x	/		CPA + m	
FLA95		3						x		d connue → 3 inconnues (mx,y,z)	Autant de mesures que d'inconnues	Inversion G
MCA77		2						x	/	Algorithme de Newton		
MER03					2			x	/			
MCA77		2						x	/	Plus de mesures que d'inconnues : pb surdéterminé	Levenberg-Marquardt	
MCF81			>6 Bz					X	/			
MCF90		1	1Bz			1		X	/			
MER03					>2			X	/			
WAH10					>2			X	/		Gauss-Newton	
MCF90					>6B zBx				X	my = 0	Calcul étape par étape à partir de B _{max} et B _{min}	
LEG11	5			1				X	d et m sur un plan → 4 inconnues / dipôle	Connaissance d'une bonne initialisation des inconnues + rotation de l'objet sur 360°	Gauss-Newton	
IGA00	>100		1B rad.				X		d connue (maillage 2D)	Régularisation de Tikhonov		

Réf érence	Nb de dipô les	Quantité et Qualité des capteurs					Contraintes sur les dipôles			Méthode de résolution	
		Scal aire	1D	2D	3D	Gra d.	Pb liné aire	Pb non- lin.	Contraintes sur les dipôles		
LEG11				1			X				
FLA92		2					X		d connue (maillage 3D)		
LEG11				1			x		d connue (maillage 2D)	Projection du champ mesuré sur une base d'Anderson	Détermine m

Tableau 8 – Récapitulatif des méthodes utilisées pour modéliser un objet magnétique – sans distinguer moments induits et permanents

Réf érence	Nb de dipôles	Quantité et Qualité des capteurs					Contraintes sur les dipôles			Méthode de résolution	
		Scal aire	1D	2 D	3D		Pb liné aire	Pb non- lin.	Contraintes sur les dipôles		
FLA95	1	3					x		Position d connue + m_k dépendant uniquement de B_k ($k = X, Y, Z$)	Trajectoire complexe avec virage (lacet) et tangage (pente)	Inversion de G
MER03					>2		x		/		Levenberg- Marquardt
ALT93		1	1By				x		d connue + m_{ind} déterminé par modèle ellipsoïde	Trajectoire selon 2 orientations (NS et SN)	Calcul manuel de m_{perm}
BRE73		1					x		d connue + χ isotrope	Rotation de l'objet sur 360°	Calcul de m_{perm} et m_{ind} à partir de B_{max} et B_{min}
BRE07					2		x		d connue + m_{ind} faible		Calcul de m_{perm} à partir de la moyenne de B
FON02	2	1			1		x		d connue	Trajectoire complexe avec virage, tangage, et roulis	Régularisation de Tikhonov
CHA01 CHA02	>200				32		x		d connue + m selon plan tangential à la surface + m_{ind} connu par géométrie	Décomposition en valeurs singulières	

Tableau 9 – Récapitulatif des méthodes utilisées pour modéliser un objet magnétique – en distinguant moments induits et permanents

Dans le cadre de notre application de ré-identification de véhicules, ce sont en particulier les méthodes utilisant plusieurs dipôles et ne distinguant pas les moments induits et permanents qui pourront servir de références [FLA92], [IGA00], [LEG11].

En effet, nous avons vu qu'étant donné la faible distance entre les véhicules et les capteurs, il sera nécessaire d'utiliser plusieurs dipôles pour les modéliser : à partir de signatures mesurées, un nombre minimum de 3 ou 4 dipôles a été déterminé. Après une tentative infructueuse de modélisation sans fixer la position des dipôles, nous avons de plus choisi de nous placer dans un problème inverse

linéaire : il faudra donc plutôt prévoir un grand nombre de positions possibles pour les dipôles, comme dans le cas des maillages décrits dans [FLA92], [IGA00], et [LEG11].

De plus, dans l'application de ré-identification de véhicules, la modélisation dipolaire sera calculée à partir d'un seul passage du véhicule, donc pour une seule orientation donnée par rapport au champ magnétique terrestre, et nous n'aurons pas d'information connue a priori sur la géométrie du véhicule : il ne sera donc pas possible de distinguer les moments induits des moments permanents.

VI.5 Ré-identification de véhicules via un problème inverse linéaire

Développons à présent le problème inverse que nous avons choisi d'étudier dans ces travaux.

La distance capteur-véhicule étant faible, il est nécessaire d'utiliser un grand nombre de dipôles pour expliquer au mieux les signatures mesurées. Pour conserver des temps de calcul compatibles avec une application de ré-identification, et éviter la contrainte de multiples réinitialisations pour ne pas tomber dans le piège de minima locaux de la fonction coût, nous avons préféré résoudre un problème inverse linéaire, au sens des moindres carrés. Nous avons donc décidé de nous placer dans le cas où les positions c_j des N_c capteurs et d_l des N_d dipôles sont supposées connues, et où seuls les moments magnétiques m_l des dipôles doivent être déterminés à partir des mesures. Le vecteur colonne p des paramètres est composé de tous les m_l .

Il faut donc définir un maillage de dipôles permettant d'expliquer les signatures mesurées par nos réseaux de capteurs, donc minimiser l'écart suivant :

$$\min(\text{Coût}(\vec{p})) = \min \left(\left\| \sum_{j=1}^{N_c} \vec{B}_j - \sum_{l=1}^{N_d} C(\vec{r}_{jl}) \cdot \vec{m}_l \right\|^2 \right) \quad (79)$$

De solution :

$$\vec{p}_{MCO} = \arg \min(\text{Coût}(\vec{p})) \quad (80)$$

Une fois les moments magnétiques m_l du maillage dipolaire calculés, l'objectif est de comparer ces « cartes » de dipôles pour chaque paire de signatures, pour décider si elles appartiennent ou non au même véhicule. La ré-identification se fera donc par calcul de distance entre les moments magnétiques des distributions dipolaires.

VI.5.a Choix du maillage de dipôles

Nous cherchons à modéliser chaque véhicule par un grand nombre de dipôles dont les positions tridimensionnelles sont connues et les moments magnétiques tridimensionnels sont inconnus. Le maillage dipolaire du volume situé au-dessus des capteurs doit permettre une modélisation suffisamment précise pour expliquer les spécificités des signatures magnétiques de chaque véhicule.

Pour expliquer les variations basse fréquence des signatures, il est nécessaire d'avoir des dipôles situés assez loin des capteurs, tandis que pour expliquer les variations haute fréquence, des dipôles doivent être proches des capteurs [FLA95]. Le maillage dipolaire doit donc comporter plusieurs hauteurs de dipôles. Nous avons donc commencé par chercher le maillage dipolaire le plus simple

possible mais suffisant pour expliquer parfaitement les signatures B mesurées, donc pour obtenir un coût, ou un score, presque nul (le score a été défini équation (48)).

Les données utilisées pour illustrer les conséquences des maillages de dipôles sur la capacité à expliquer les signatures mesurées sont celles de janvier 2011, pour le véhicule Berlingo. Rappelons que les véhicules passaient alors au-dessus d'une plaque de 10 capteurs magnétiques tri-axes.

Parmi les 10 capteurs, nous allons utiliser une ligne latérale de 3 capteurs espacés de 0.25m, et mis en évidence sur la figure suivante. Ils sont respectivement appelés de gauche à droite : « capteur gauche », « capteur central », et « capteur droit » :

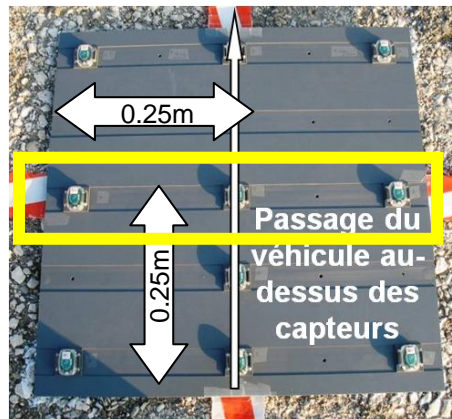


Figure 82 – Plaque de 10 capteurs magnétiques tri-axes sans fil

Physiquement, les dipôles ne peuvent pas être longitudinalement situés au-delà de la longueur de la signature magnétique mesurée. Pour limiter le nombre de dipôles nuls, nous avons donc cherché la taille minimale des signatures mesurées lors des campagnes de janvier 2011 et de mars 2012, pour définir l'étalement longitudinal des dipôles du maillage, et nous avons obtenu 4.80m.

Nous avons testé plusieurs maillages dipolaires, en faisant varier la fréquence spatiale des dipôles sur l'axe X, sur l'axe Y, et sur l'axe Z. Le maillage le plus simple était composé d'une seule ligne longitudinale de dipôles, et le plus complexe était composé de trois plans de dipôles de hauteurs différentes, et maillés finement sur les axes X et Y.

Voici un maillage simple composé d'une seule ligne de 7 dipôles situés à une hauteur de 0.5m au-dessus du sol, et couvrant une longueur de 4.80m sur X. Ces dipôles sont donc espacés de 0.80m sur l'axe X longitudinal. Le maillage de capteurs (en noir), représenté ici pour les mesures de janvier 2011, sera expliqué dans le prochain paragraphe :

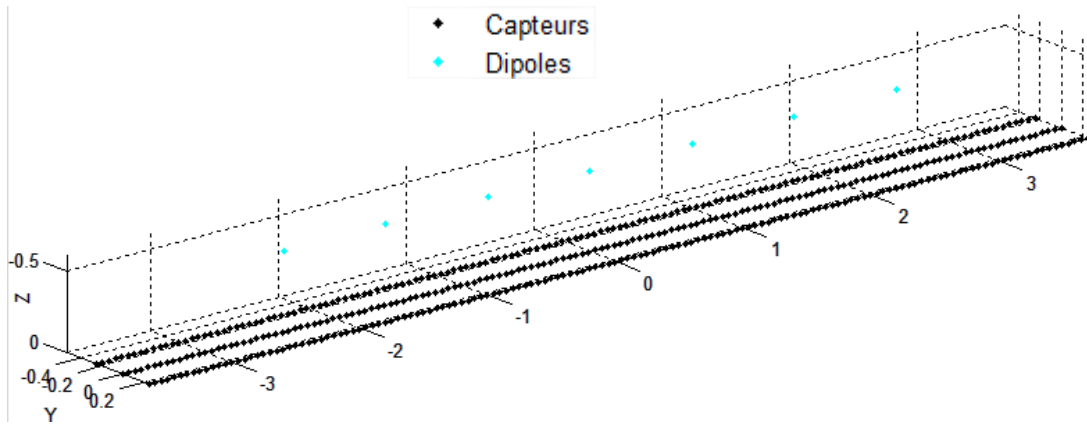


Figure 83 – Maillage composé d'une ligne longitudinale de 7 dipôles, espacés de 0.80m, à une hauteur de 0.5m

Il y a 3 inconnues par dipôle (m_x , m_y , m_z) soit 21 inconnues. Dans cette partie, nous résolvons le problème inverse linéaire sans régularisation, car le seul objectif est de savoir si la configuration de dipôles permet d'obtenir un score nul, sans se préoccuper de la stabilité du système, donc sans évaluer son conditionnement.

La figure suivante compare le champ magnétique mesuré au passage d'un véhicule par le capteur central de la plaque de capteurs (en bleu, vert, rouge), et le champ magnétique modélisé (en cyan, jaune, violet).

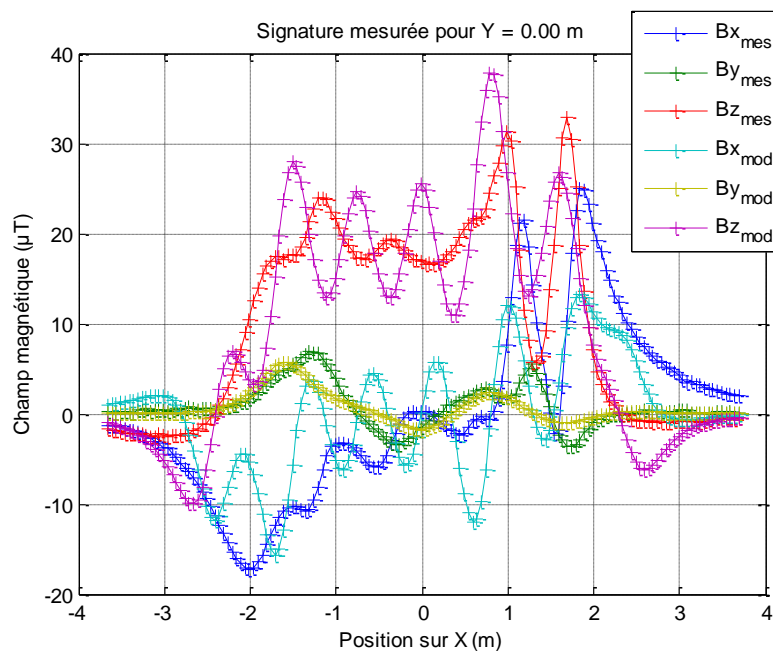


Figure 84 – Comparaison champ mesuré par capteur central / champ modélisé pour un Berlingo. Le score vaut ~ 0.4 à cause des oscillations autour de la valeur mesurée.

Seuls, les dipôles à 0.5m sont trop près pour expliquer la variation basse fréquence de la signature. Ils génèrent un champ qui oscille autour de sa valeur moyenne. La fréquence d'oscillation correspond toutefois assez bien à celle visible dans les variations rapides de la signature. La hauteur de 0.5m semble donc adaptée pour expliquer les hautes fréquences du champ mesuré.

Regardons à présent ce que donne ce même modèle sur les signatures mesurées par les capteurs gauche et droit :

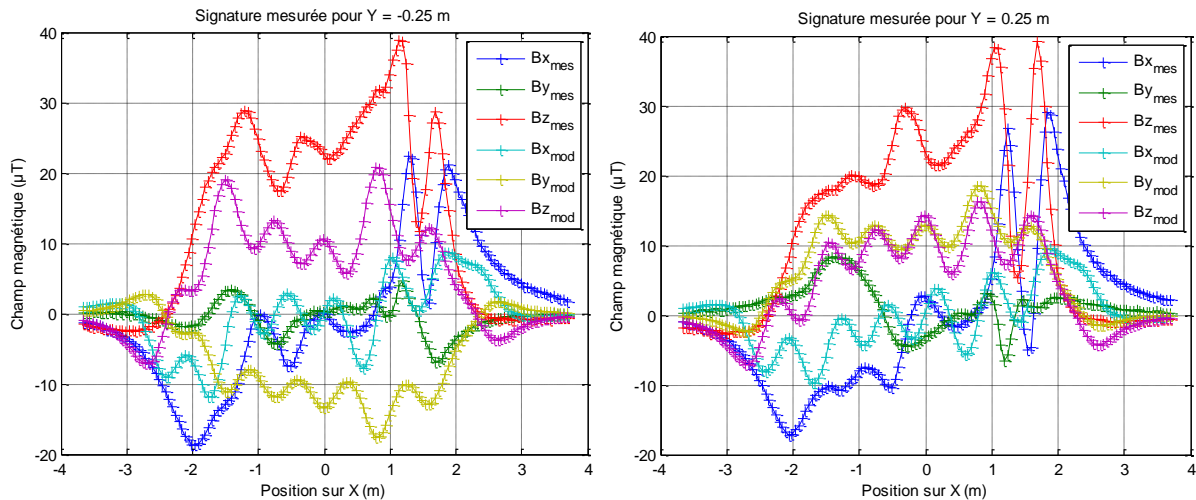


Figure 85 – Comparaison champ mesuré par capteur gauche et droit / champ modélisé pour un Berlingo. Le score vaut ~ 0.7 pour les deux signatures.

La simple ligne de dipôles à 0.5m de haut ne permet pas de modéliser à la fois les champs mesurés par le capteur central et par les capteurs latéraux.

Dans le but d'expliquer les variations plus basses fréquences, ajoutons à présent une ligne de 7 dipôles espacés de 0.8m à une hauteur de 1.5m. En s'inspirant de la règle établie par [FLA95] sur l'espacement entre les dipôles en fonction de leur distance aux capteurs (« Au sein d'une couche de dipôles donnée, et située à une distance minimale de h par rapport aux capteurs, les dipôles doivent être espacés au maximum de $h/2$ »), on choisit de mailler plus finement les dipôles situés à une hauteur de 0.5m par rapport à ceux situés à 1.5m. Nous les espaçons à présent de 0.60m au lieu de 0.80m : la ligne passe de 7 à 9 dipôles (toujours en respectant une longueur maximale de 4.80m). Enfin, dans le but de mieux expliquer les signatures mesurées par les capteurs gauche et droit, nous ajoutons 2 autres lignes de dipôles espacées de 0.60m sur l'axe Y, formant ainsi un plan de 3 x 9 dipôles à 0.5m de haut. Dans ce modèle, il y a 34 dipôles :

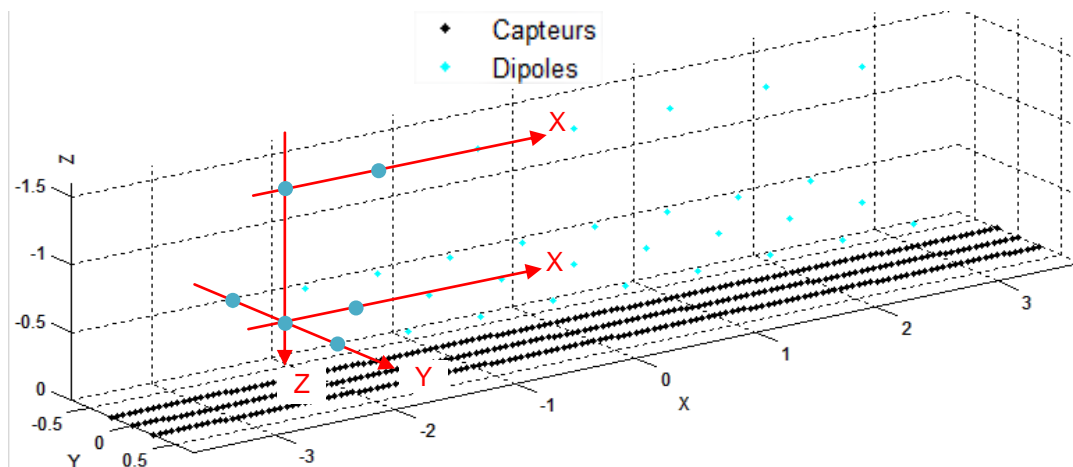


Figure 86 – Maillage composé d'une ligne longitudinale de 7 dipôles, espacés de 0.80m, à une hauteur de 1.5m, et d'un plan horizontal de 3 x 9 dipôles, espacés de 0.60m sur X et sur Y, à une hauteur de 0.5m

Il y a également 3 inconnues par dipôle (m_x , m_y , m_z) soit 102 inconnues. Nous résolvons encore une fois le problème inverse sans régularisation :

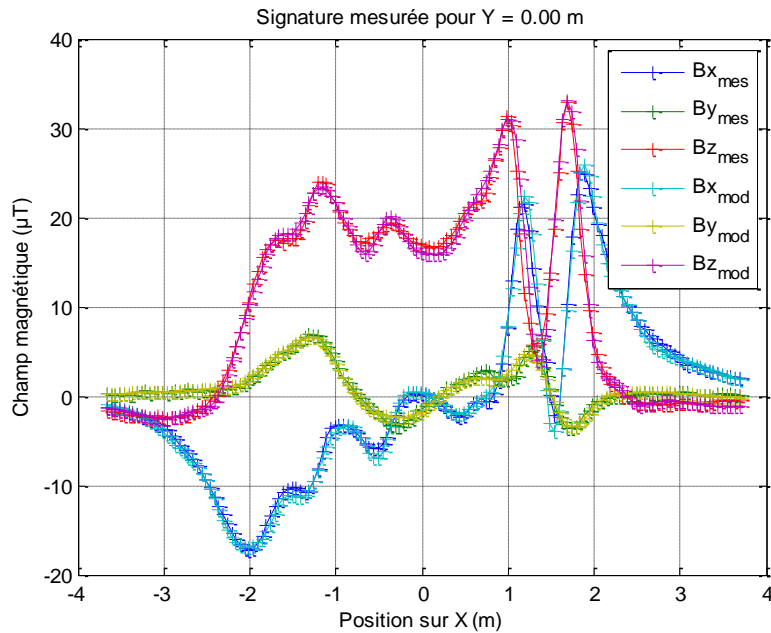


Figure 87 – Comparaison champ mesuré / champ modélisé pour un Berlingo. Le score est inférieur à 0.1.

La signature mesurée par le capteur central est parfaitement expliquée par la distribution dipolaire composée d'un plan à 0.5m et d'une ligne à 1.5m.

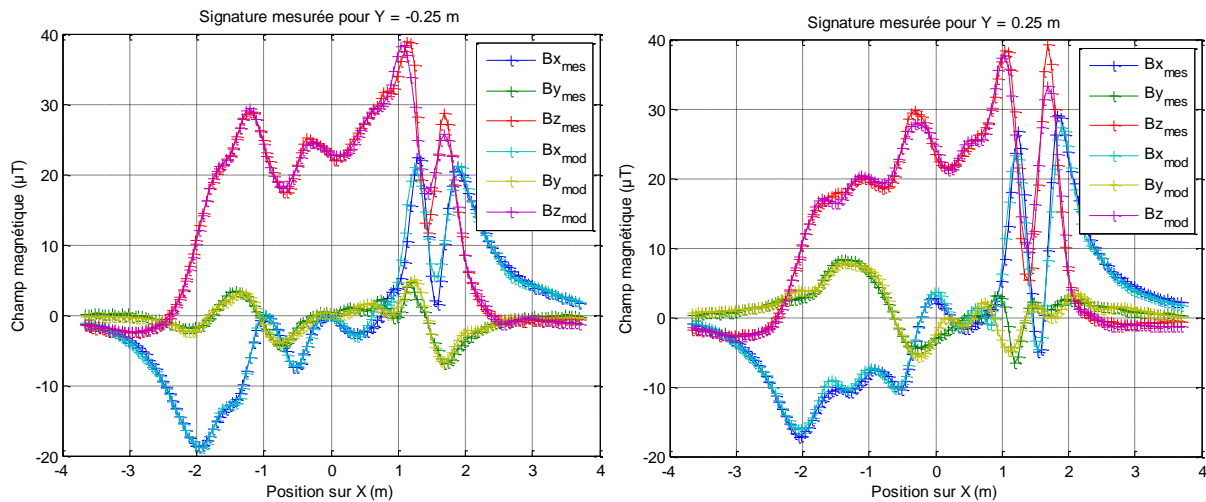


Figure 88 – Comparaison champ mesuré par capteur gauche et droit / champ modélisé pour un Berlingo. Le score est inférieur à 0.1.

Les signatures mesurées par les capteurs latéraux sont également presque parfaitement expliquées par la distribution dipolaire composée d'un plan à 0.5m et d'une ligne à 1.5m.

Pour modéliser les signatures mesurées par une ligne latérale de trois capteurs espacés de 0.25m lors de notre campagne de mesures de janvier 2011, une distribution composée de trois lignes de 9

dipôles espacés de 0.60m selon les axes X et Y et à une hauteur de 0.5m, à laquelle on ajoute une ligne de 7 dipôles espacés de 0.80m selon l'axe X et centré sur l'axe Y, semble donc tout à fait suffisante.

Toutefois, si nous souhaitons utiliser la modélisation dipolaire pour pouvoir s'affranchir du décalage latéral du véhicule entre deux passages au-dessus des capteurs, le maillage doit avoir une fréquence spatiale latérale assez fine pour proposer une position de dipôle à chaque pas significatif de décalage. De plus, cette fréquence spatiale devra être identique pour toutes les hauteurs des dipôles (ce qui va à l'encontre de la règle de [FLA92] énoncée précédemment).

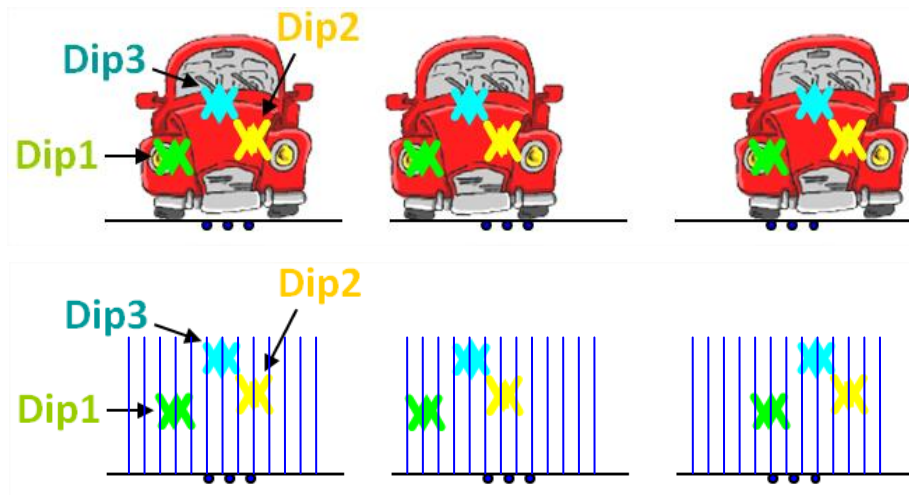


Figure 89 – Reprise du même exemple de distribution de dipôles dans un véhicule. Pour que la résolution du problème inverse linéaire retrouve bien le même modèle quel que soit le décalage latéral du véhicule (à une translation sur Y près), il faut que chaque position de dipôle tombe sur une des positions prévues par le maillage.

Rappelons que la méthode de ré-identification par comparaison directe de paires de signatures avait besoin d'un maillage latéral d'un capteur tous les 0.20m, afin d'avoir un décalage latéral maximum entre deux passages d'un véhicule de 0.10m. Avec ce décalage maximum, les signatures mesurées étaient suffisamment peu déformées pour que deux paires de signatures d'un même véhicule soient reconnues comme telles.

Comme la méthode de ré-identification par modélisation devrait permettre de s'affranchir de cette déformation due au décalage latéral (car elle remonte à la position relative des dipôles par rapport aux capteurs), nous avons pris un pas deux fois plus grand (0.20m au lieu de 0.10m) pour définir la fréquence spatiale de dipôles selon Y. Cela permet de diviser le nombre de dipôles par deux, et d'améliorer le conditionnement de notre problème. Nous avons également repris cette même fréquence de maillage sur l'axe longitudinal X.

Nous avons donc défini un nouveau maillage dipolaire composé de deux plans : l'un à hauteur de 0.5m et l'autre à 1.5m. Nous limitons toujours la longueur des dipôles sur l'axe X longitudinal à 4.80m, ce qui correspond à 25 dipôles espacés de 0.20m. La largeur de chaque plan sur l'axe Y latéral est choisie de 1.2m (0.6m de chaque côté de l'axe X), ce qui correspond à 7 dipôles espacés de 0.20m. Le modèle contient donc 350 dipôles.

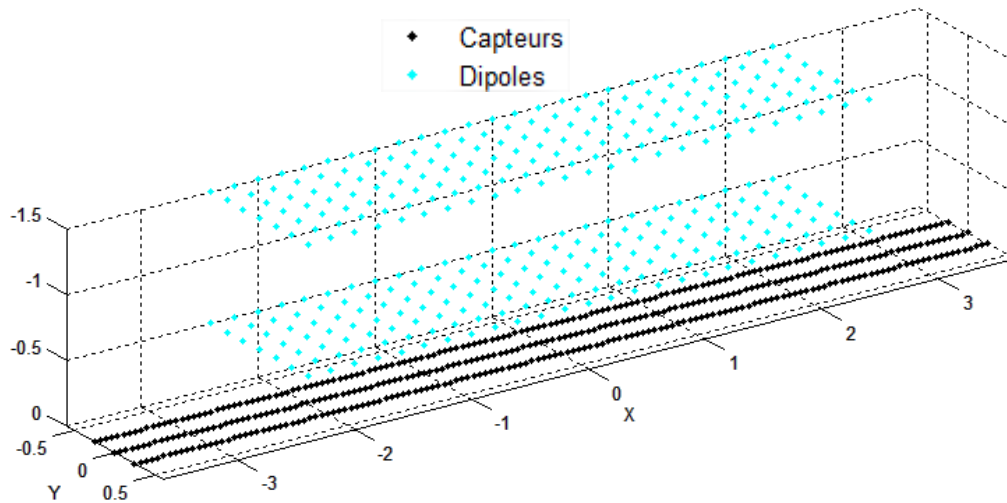


Figure 90 – Maillage fin composé de deux plans horizontaux de 25 x 7 dipôles, espacés de 0.20m sur X et sur Y, à une hauteur de 0.5m et de 1.5m

Il y a 3 inconnues par dipôle (m_x , m_y , m_z) soit 1050 inconnues. Sans régularisation, un tel maillage permet d'expliquer avec un score de l'ordre de 0.02 les signatures mesurées par les 3 capteurs :

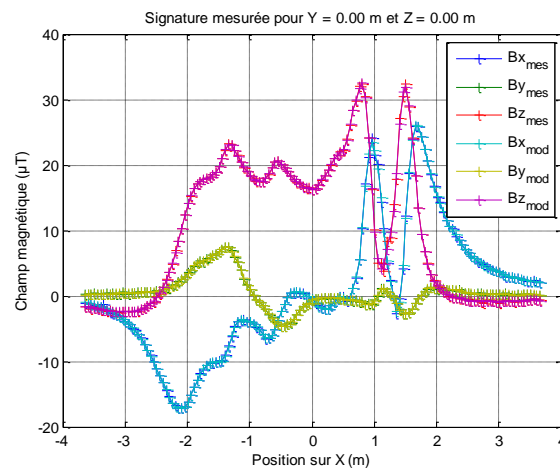


Figure 91 – Comparaison champ mesuré par capteur central / champ modélisé pour un Berlingo. Le score est de 0.02.

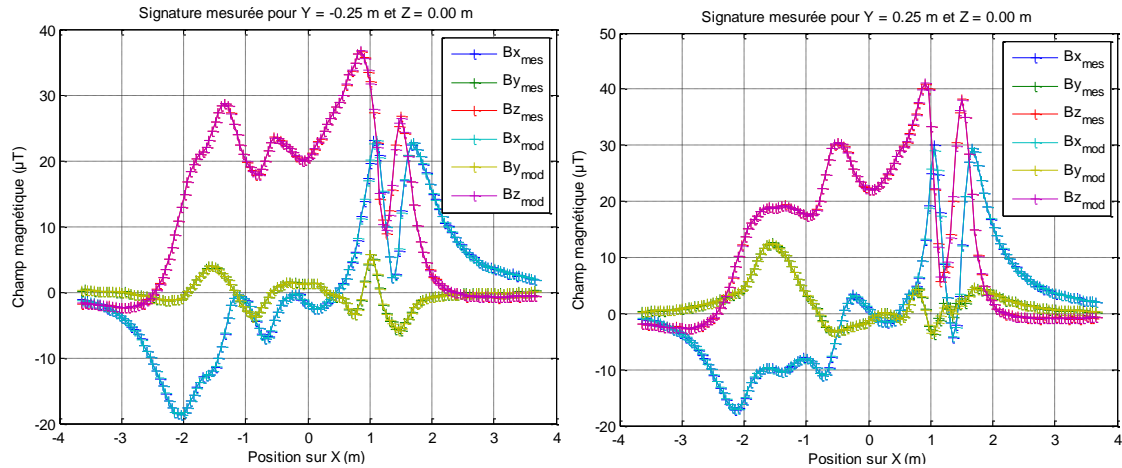


Figure 92 – Comparaison champ mesuré par capteur gauche puis droit / champ modélisé pour un Berlingo. Le score est de 0.02.

Pour répondre à la fois au besoin d'expliquer parfaitement les signatures mesurées et au besoin de s'affranchir du décalage latéral, nous avons défini un maillage de dipôles complexe. Pour connaître le conditionnement atteint par ce maillage de 350 dipôles, et donc établir la stabilité du problème inverse, il nous faut définir la position des capteurs.

VI.5.b Choix du maillage de capteurs et conditionnement associé

Dans le cadre de la campagne de mesures de janvier 2011, nous avons à disposition une ligne latérale de 3 capteurs tridimensionnels espacés de $\Delta y = 0.25\text{m}$ selon l'axe Y, à hauteur du sol (origine de l'axe vertical Z). Cette ligne latérale permet d'obtenir 9 mesures.

Lors des prétraitements des signatures, nous avons arbitrairement ré-échantillonné les signatures spatiales tous les cm, à l'aide d'une interpolation linéaire. Virtuellement, cela correspond à un maillage de capteurs espacés de 0.01m selon l'axe longitudinal X, sur une longueur égale à celle de la signature spatiale enregistrée.

Contrairement aux axes Y et Z où nous sommes contraints par la position des capteurs posés sur la route, nous avons donc la possibilité de choisir la fréquence d'échantillonnage spatial Δx de la signature spatiale selon X (avec $\Delta x \geq 0.01\text{m}$), ainsi que la portion L_x de la longueur de la signature prise en compte (avec $L_x \leq \text{longueur de la signature spatiale}$).

Virtuellement, ces choix sur X définissent un maillage virtuel de capteurs au niveau du sol, représenté en noir sur les figures précédentes de maillages de dipôles.

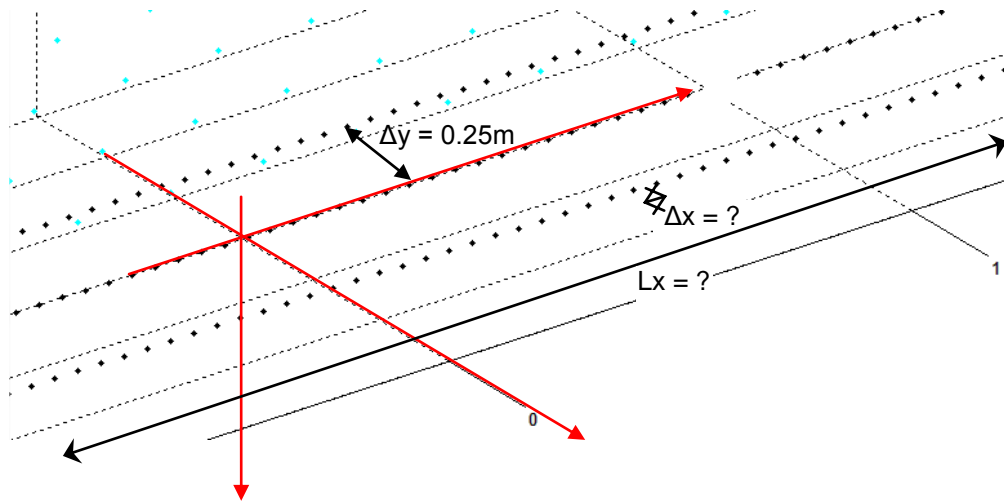


Figure 93 – Paramètres variables du maillage virtuel de capteurs – Mesures de janvier 2011

De même, pour les mesures de mars 2012, les positions des 9 capteurs selon Y sont fixes, mais la fréquence spatiale Δx et la longueur spatiale Lx des capteurs selon X est modifiable.

Nous avons choisi de prendre la valeur maximale possible de Lx pour chaque signature, i.e. de prendre une Lx variable qui vaut la longueur de la signature traitée (soit 4.8m au minimum sur la base de données de signatures disponibles). Le choix de Δx permet de régler la détermination du problème inverse : si le nombre de mesures effectuées par les capteurs virtuels est inférieur au nombre de dipôles du maillage, on se placera dans un problème sous-déterminé. A l'inverse, si le nombre de mesures est supérieur, le problème sera surdéterminé. Rappelons que la configuration de dipôles choisie entraîne 1050 inconnues à déterminer.

Etant préférable de se placer dans un problème surdéterminé tout en limitant le temps de calcul nécessaire pour manipuler les données, nous avons choisi un compromis avec $\Delta x = 0.05m$. En effet, pour la configuration de janvier 2011, cela correspond pour la plus petite signature mesurée à 97 capteurs par ligne selon X, soit 291 capteurs virtuels, et donc 873 mesures. Nous sommes donc un peu en dessous du nombre de mesures nécessaires pour être dans un problème surdéterminé (1050 mesures), qui ne sera atteint qu'à partir de signatures de 5.80m de long. Toutefois, 80% des signatures mesurées au cours de cette campagne dépassent cette longueur seuil.

Pour la configuration de mars 2012, $\Delta x = 0.05m$ correspond pour la plus petite signature mesurée à 97 capteurs par ligne selon X, soit 873 capteurs virtuels, et donc 2619 mesures. Nous sommes donc toujours dans le cas d'un problème surdéterminé.

Connaissant les positions des dipôles et des capteurs, nous pouvons à présent calculer le conditionnement de la matrice C qui relie B à m. Reprenons les trois maillages dipolaires présentés ci-dessus : une ligne de 7 dipôles à 0.5m (distribution 1), une ligne de 7 dipôles à 1.5m avec un plan de 9 x 3 dipôles à 0.5m de haut (distribution 2), puis le maillage fin avec deux plans de 25 x 7 dipôles à 0.5m et 1.5m de haut (distribution 3), nécessaire pour essayer de s'affranchir du décalage latéral des véhicules. Voici leurs conditionnements calculés pour différentes valeurs de Δx :

Données	Δx	Distribution 1	Distribution 2	Distribution 3
Janv.2011	0.05m	$\text{cond}(C) \approx 2$	$\text{cond}(C) \approx 10^4$	$\text{cond}(C) \approx 10^{18}$
	0.20m	$\text{cond}(C) \approx 2$	$\text{cond}(C) \approx 10^4$	$\text{cond}(C) \approx 10^8$
	1.50m	$\text{cond}(C) \approx 3$	$\text{cond}(C) \approx 5.10^4$	$\text{cond}(C) \approx 10^4$
Mars2012	0.05m	$\text{cond}(C) \approx 2$	$\text{cond}(C) \approx 10^3$	$\text{cond}(C) \approx 10^{17}$
	0.20m	$\text{cond}(C) \approx 2$	$\text{cond}(C) \approx 10^3$	$\text{cond}(C) \approx 10^{19}$
	1.50m	$\text{cond}(C) \approx 2$	$\text{cond}(C) \approx 2.10^3$	$\text{cond}(C) \approx 10^{18}$

Tableau 10 – Comparaison des conditionnements pour plusieurs distributions dipolaires

Dès que l'on passe à un modèle plus complexe qu'une ligne de dipôles, le conditionnement devient très grand. Notons que si l'on compare le conditionnement obtenu pour janvier 2011 et pour mars 2012), on voit que mars 2012 améliore le conditionnement d'un facteur 10. Par ailleurs, un choix de Δx plus grand que la valeur retenue (0.05m de façon à se placer dans un problème surdéterminé dans la majorité des cas) ne modifie pas l'ordre de grandeur du conditionnement pour les distributions 1 et 2, ni pour la configuration de capteurs de mars 2012. Le seul cas où le conditionnement varie favorablement avec l'augmentation de Δx est la configuration de capteurs de janvier 2011 avec la distribution 3. Ce faible impact de Δx sur le conditionnement est cependant étonnant : plus les capteurs sont espacés, plus l'on peut s'attendre à ce qu'ils soient indépendants, et donc qu'ils améliorent le conditionnement de G.

Si l'on étudie les dépendances des colonnes de G dans le cas de la distribution 3, qui va être utilisée par la suite, on trouve un fort lien entre les moments de deux dipôles voisins :

- Dipôles voisins, ayant la même position sur X et un écart de 0.20m sur Y : leurs m_x sont corrélés, et leurs m_y et m_z sont anticorrélés,
- Dipôles voisins, ayant la même position sur Y et un écart de 0.20m sur X : leurs m_y sont corrélés, et leurs m_x et m_z sont anticorrélés,

Compte-tenu des contraintes sur la définition du maillage dipolaire, et des contraintes sur les positions des capteurs, le problème inverse à résoudre est donc très instable. Par conséquent, une régularisation du problème est nécessaire.

VI.5.c Mise en place d'une régularisation et ses conséquences

Avec un mauvais conditionnement, une faible erreur de mesure de B entraînera une grande variation de la solution m trouvée. Or dans le cas d'une application de ré-identification, les « erreurs » de mesure correspondent aux légères variations du champ mesuré à chaque passage d'un même véhicule, en fonction par exemple de son décalage latéral, ou de son orientation par rapport au champ magnétique terrestre qui fera varier les moments induits.

Un mauvais conditionnement entraînera donc une grande distance entre les modèles dipolaires calculés pour un même véhicule, donc une grande distance « intra-véhicule » au sein de la Classe « même ». Cette distance deviendra comparable à celle observée entre deux modèles dipolaires de véhicules différents (distance « inter-véhicules » au sein de la Classe « différents »), et la ré-identification ne sera plus possible.

Voici une illustration des modèles obtenus pour trois passages d'un même véhicule, pour une orientation donnée, avec la distribution 2 (une ligne de 7 dipôles à 1.5m avec un plan de 9 x 3 dipôles à 0.5m de haut), sans régularisation, puis avec une régularisation de Tikhonov :

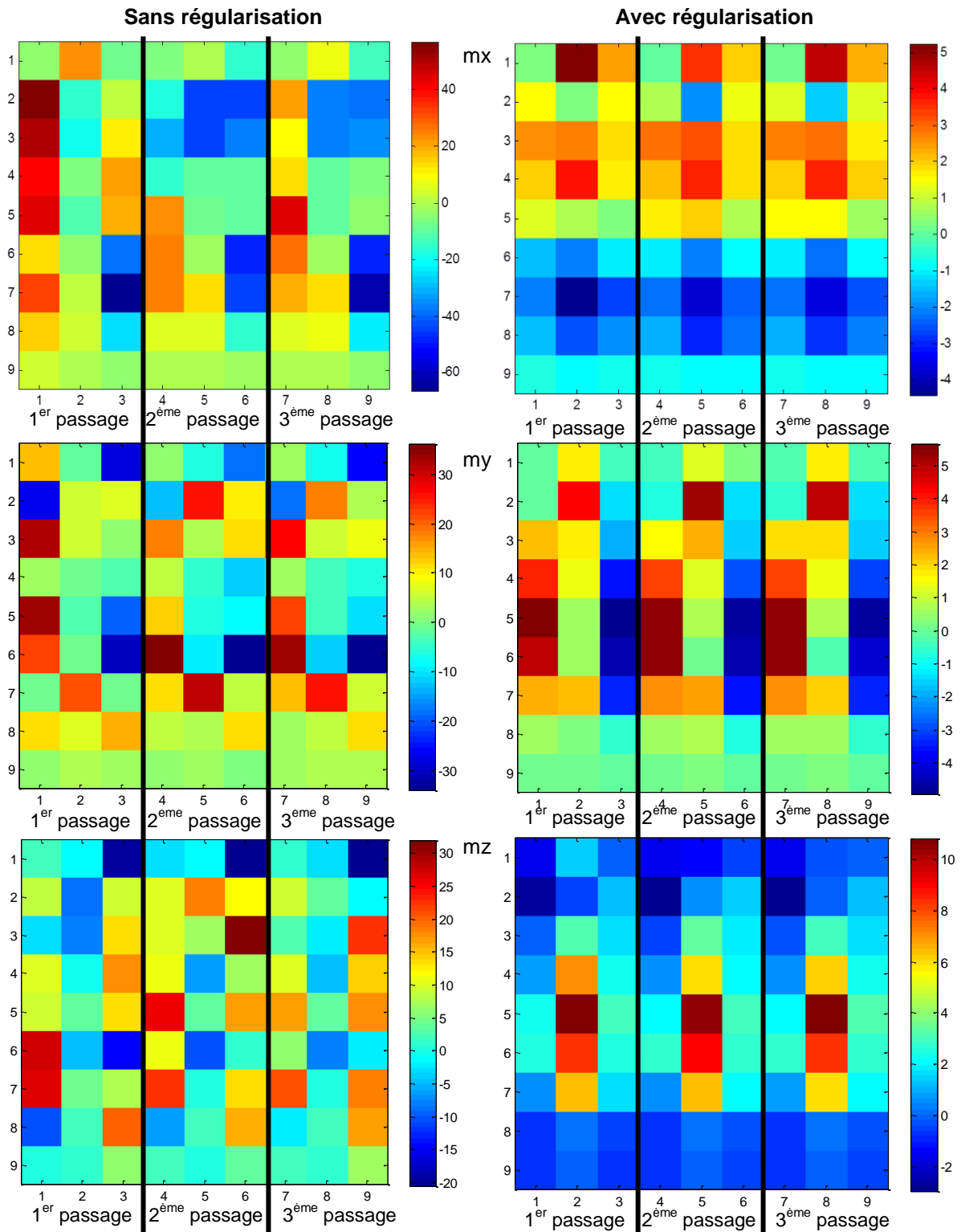


Figure 94 – Moments m_x , m_y et m_z calculés sur le plan de dipôles à 0.5m de haut, composé de 9 x 3 dipôles, exprimés en $A.m^2$, pour trois passages d'un même véhicule, sans, puis avec régularisation.

La régularisation choisie consistait à contraindre les moments à être de norme minimale :

$$\min \left(\left\| \vec{B} - C.\vec{m} \right\|^2 + \alpha \cdot \left\| \vec{m} \right\|^2 \right) \quad (81)$$

L'effet de la contrainte sur la norme des moments magnétiques est bien visible : ils sont de norme 3 à 10 fois plus faible avec régularisation. De plus, avec la régularisation, les modèles calculés sont beaucoup plus similaires pour les trois passages du même véhicule, en particulier si l'on compare le 1^{er} et le 2^{ème} passage. La régularisation de Tikhonov permet d'atténuer la distance intra-véhicule au sein de la Classe « même ». Cela se fait par contre au détriment du score, qui mesure l'écart entre la signature mesurée et la signature modélisée.

Comment choisir α , le paramètre de régularisation qui pondère la contrainte ajoutée sur les solutions trouvées ? Nous rappelons que si α est trop petit, la régularisation ne sera pas suffisante, le problème sera encore instable, et la distance intra-véhicule restera grande. A l'inverse, si α est trop grand, on ne cherchera plus à modéliser le champ mesuré, mais uniquement à avoir une solution de norme minimale : la distance intra-véhicule va certes fortement diminuer, mais la distance inter-véhicules également. Dans les deux cas, le taux de bonnes détections sans fausse alarme obtenu sera faible.

Le bon paramètre α sera celui qui donne le meilleur taux de ré-identification possible. Nous avons tout d'abord appliqué la méthode classique de choix du paramètre α , en construisant la courbe en L qui trace l'écart entre le champ mesuré et le champ modélisé, en fonction de la norme de la solution trouvée. Le résultat présenté a été obtenu pour une des signatures mesurées en mars 2012, en utilisant les 9 capteurs à disposition sur l'axe latéral :

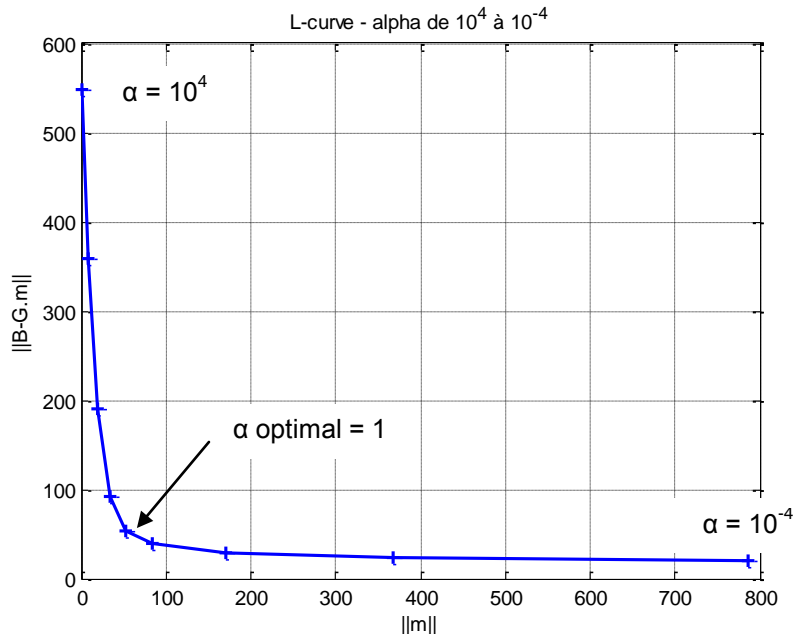


Figure 95 – Régularisation de Tikhonov – Choix du paramètre α par la méthode de la courbe en L

D'après cette méthode, α devrait donc valoir 1. Toutefois, nous avons obtenu de meilleurs taux de ré-identification pour une valeur plus grande d' α : 10³. Pour compenser le très mauvais conditionnement de notre problème, il faut donc appliquer une forte contrainte sur m et une plus faible contrainte sur le score. Les modèles calculés expliquent donc moins bien les signatures mesurées :

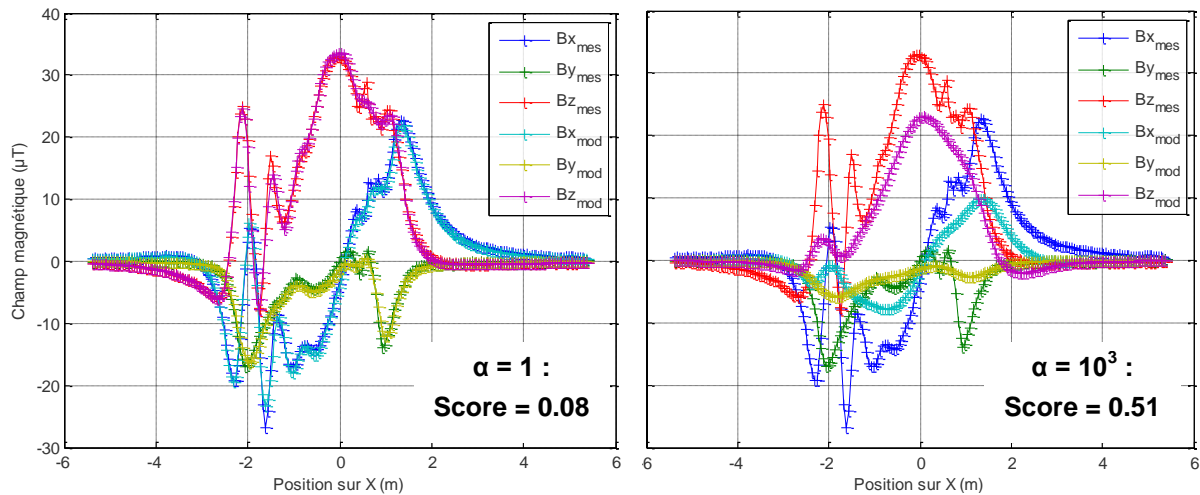


Figure 96 – Illustration de l'influence de la régularisation sur le score : une plus forte pondération de la régularisation entraîne un plus grand écart entre champ mesuré et champ modélisé, donc un score plus grand.

Mais cette contrainte sur les moments est nécessaire pour diminuer la distance intra-véhicule au sein de la Classe « même », et la séparer de la distance inter-véhicules au sein de la Classe « différents » sur l'histogramme des distances. Les figures suivantes illustrent l'histogramme des distances entre les modèles calculés, en distinguant la Classe « même » (en bleu) de la Classe « différents » (en rouge). Les deux premières figures présentent les résultats pour $\alpha=1$, et les deux dernières figures pour $\alpha=10^3$:

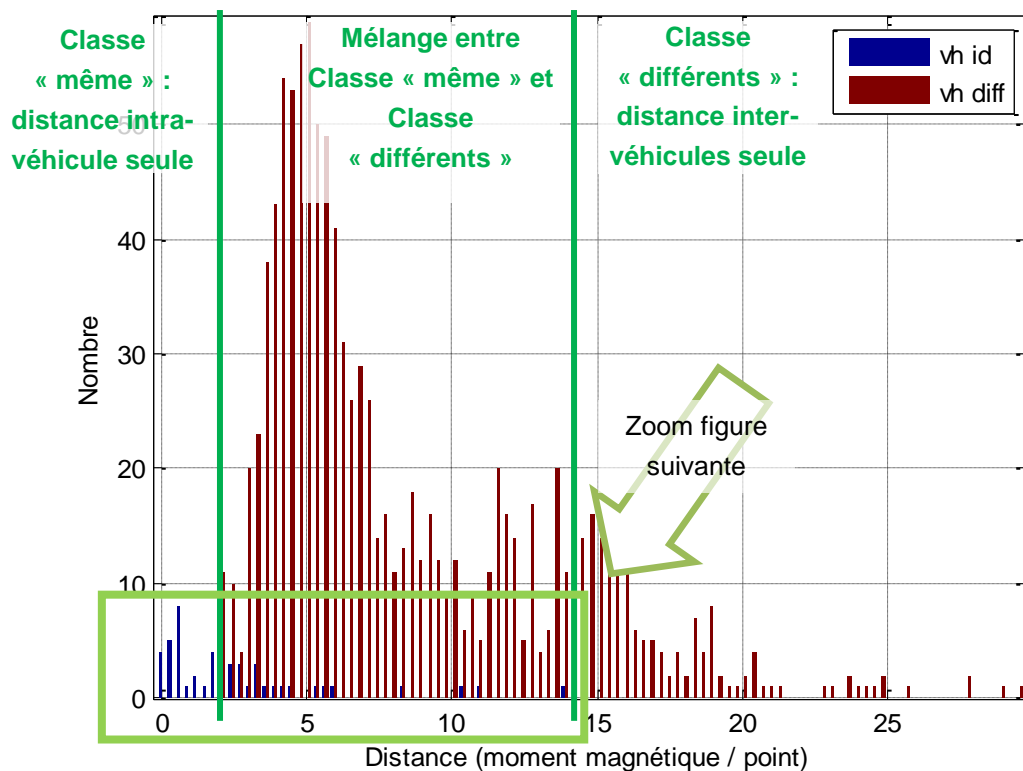


Figure 97 – Mesures de mars 2012, pour 9 capteurs latéraux, et pour la même orientation (Nord) - Histogramme des distances intra et inter-véhicules, avec $\alpha = 1$. Illustration pour une distance euclidienne non-normalisée.

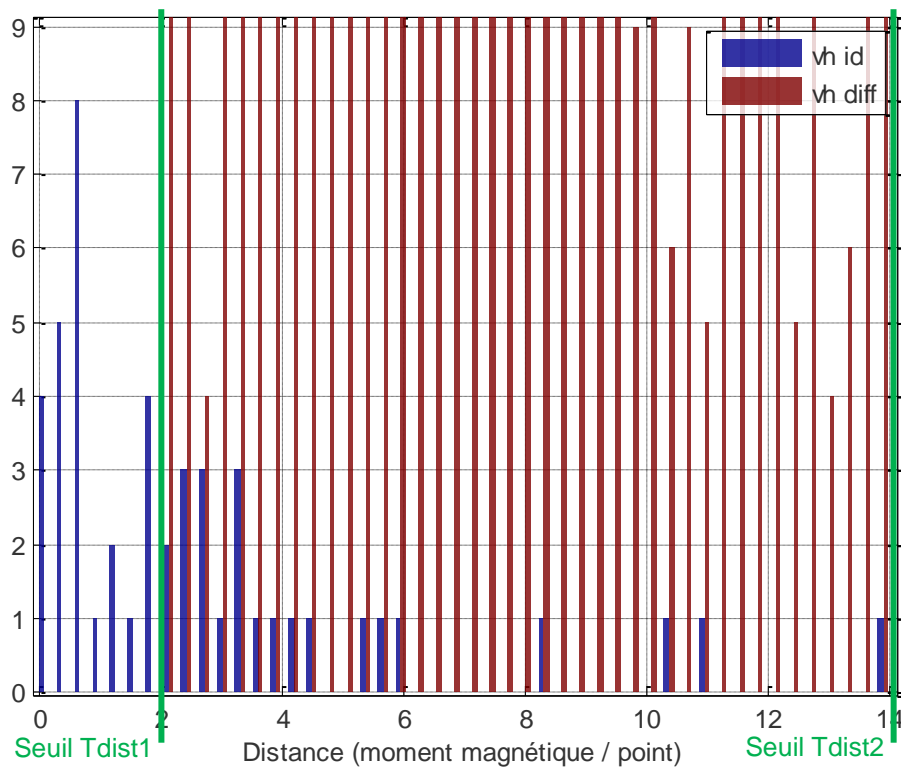


Figure 98 – Zoom de la figure précédente : les distances calculées pour des paires de signatures provenant du même véhicule (« vh id » en bleu) ne peuvent être distinguées des distances calculées pour des paires de signatures provenant de véhicules différents (« vh diff » en rouge)

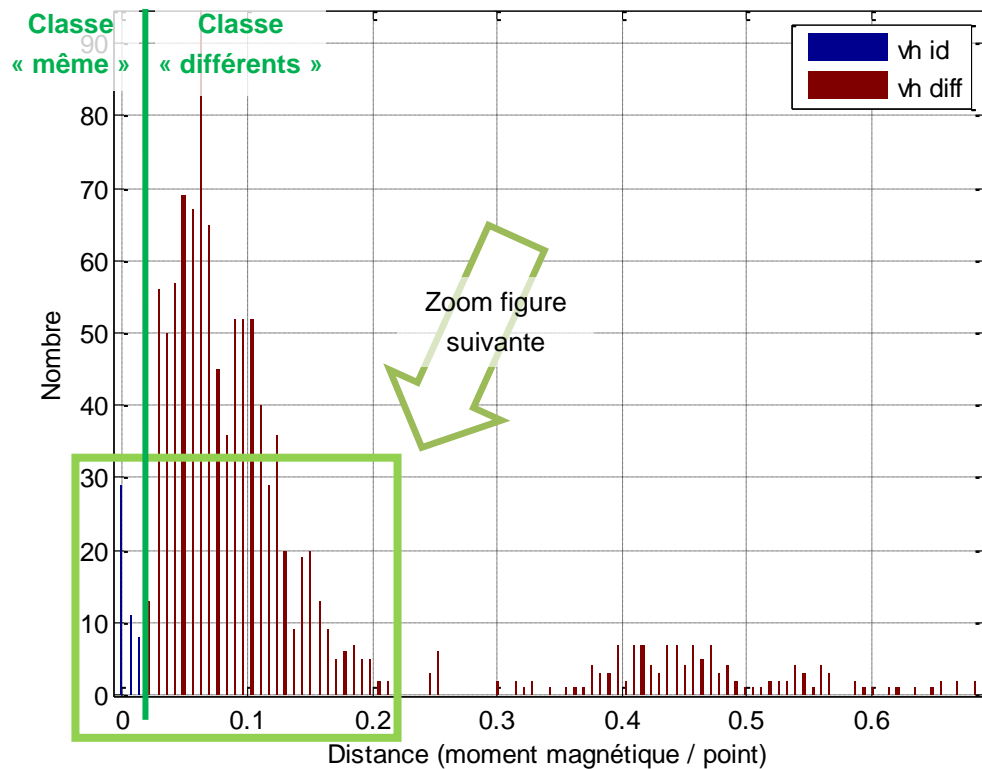


Figure 99 – Mesures de mars 2012, pour 9 capteurs latéraux, et pour la même orientation (Nord) - Histogramme des distances intra et inter-véhicules, avec $\alpha = 10^3$. Illustration pour une distance euclidienne non-normalisée.

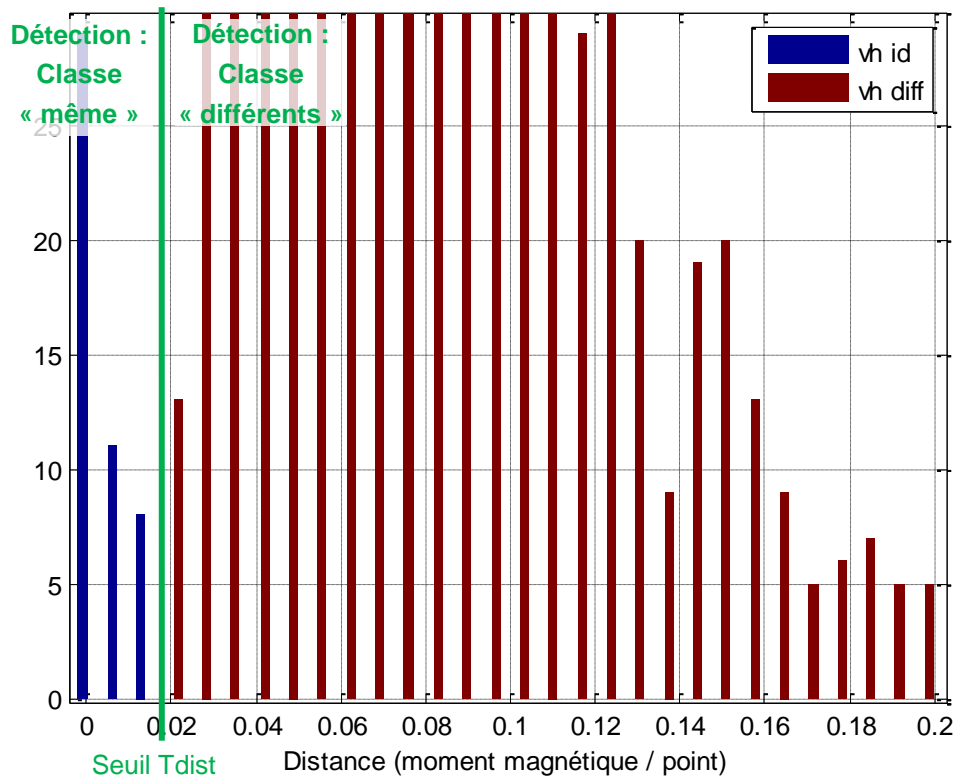


Figure 100 – Zoom de la figure précédente : les distances calculées pour des paires de signatures provenant du même véhicule (« vh id » en bleu) peuvent être distinguées des distances calculées pour des paires de signatures provenant de véhicules différents (« vh diff » en rouge) avec un seuil Tdist de 0.02

La plus petite valeur de α testée ($\alpha=1$) ne permet pas de séparer les distances intra et inter-véhicules, alors que la plus grande valeur de α le permet, ce qui indique un taux de ré-identification de 100% sans fausse alarme. On remarque également que la distance maximale entre les modèles a diminué avec l'augmentation de α : c'est cohérent avec la forte contrainte sur la norme des modèles entraînée par la forte régularisation.

VI.5.d Performances de ré-identification avec régularisation

Une fois la modélisation dipolaire obtenue, on ne compare plus directement les paires de signatures S1 et S2, mais leurs modèles respectifs m1 et m2, définis chacun avec le même nombre de dipôles Nd. Chaque modèle est décrit par les moments magnétiques tridimensionnels de ses Nd dipôles : chaque l-ième dipôle possède un moment magnétique mx_l sur l'axe X, my_l sur l'axe Y, et mz_l sur l'axe Z.

Il faut donc définir la distance entre deux distributions dipolaires. Une fois cette distance définie, on peut construire un détecteur, dont les performances sont évaluées de la même façon que dans le chapitre précédent, en traçant en particulier la courbe BD-PE (taux de bonnes détections BD en fonction du pourcentage d'erreurs PE).

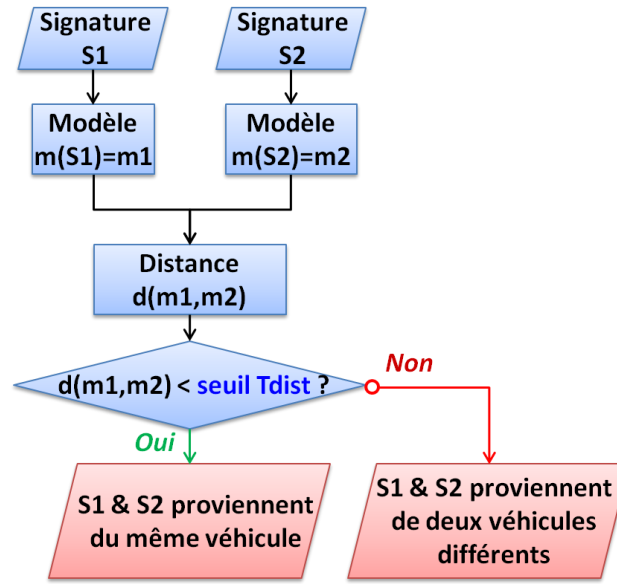


Figure 101 – Schéma du principe du détecteur à partir d'une mesure de distance entre modèles dipolaires

Ces performances sont étudiées en fonction de plusieurs paramètres : le changement d'orientation du véhicule, toujours pour évaluer la dégradation due aux moments magnétiques induits, et la simulation de décalage latéral du véhicule entre deux passages. Nous n'avons par contre pas fait dans ce chapitre de vérification sur les données mesurées en accélération, étant donné que leur déformation n'était pas assez importante pour privilégier la distance DTW par rapport à la distance euclidienne (V.4.c).

VI.5.d.1 Calcul de distances entre deux distributions dipolaires

Présentons à présent la façon dont les distances entre distributions dipolaires m_1 et m_2 sont calculées dans nos travaux. Le principe général du calcul de distance entre distributions consiste à comparer deux à deux les N_d dipôles de m_1 et de m_2 situés à la même position d_i du maillage dipolaire : on comparera donc les moments magnétiques mx_{1i} , my_{1i} et mz_{1i} du i -ième dipôle de m_1 de coordonnées $(2.4m, -0.6m, -0.5m)$ avec les moments mx_{2i} , my_{2i} et mz_{2i} du i -ième dipôle de m_2 de coordonnées $(2.4m, -0.6m, -0.5m)$.

Nous avons choisi deux types de distances classiques : une mesure de similitude avec le coefficient de corrélation, calculé à partir de la covariance entre les moments, et une mesure de distance euclidienne, divisée par le nombre de dipôles à comparer. Ces distances sont calculées séparément sur les moments mx , my , mz , pour obtenir trois distances monodimensionnelles, puis sur l'ensemble des moments magnétiques, pour obtenir une distance tridimensionnelle.

Voici $CoeffCorrX$, la mesure de similitude monodimensionnelle calculée à partir des coefficients de corrélation des moments magnétiques mx_1 et mx_2 , qui sont des vecteurs de taille N_d :

$$CoeffCorrX(\vec{mx}_1, \vec{mx}_2) = \frac{cov(\vec{mx}_1, \vec{mx}_2)}{\sigma(\vec{mx}_1)\sigma(\vec{mx}_2)} \quad (82)$$

$cov(mx_1, mx_2)$ est appelée la covariance entre les moments magnétiques mx_1 et mx_2 : plus elle est grande, plus mx_1 et mx_2 sont dépendantes linéairement. A l'inverse, si la covariance est nulle, alors mx_1 et mx_2 sont indépendantes linéairement.

$$\text{cov}(\vec{mx1}, \vec{mx2}) = \frac{1}{Nd} \sum_{l=1}^{Nd} ((mx1_l - \overline{mx1})(mx2_l - \overline{mx2})) \quad (83)$$

$\sigma(mx1)$ est l'écart-type de $mx1$. Il correspond à la racine carrée de la variance var de $mx1$:

$$\sigma(\vec{mx1}) = \sqrt{\text{var}(\vec{mx1})} = \sqrt{\text{cov}(\vec{mx1}, \vec{mx2})} = \sqrt{\frac{1}{Nd} \sum_{l=1}^{Nd} (mx1_l - \overline{mx1})^2} \quad (84)$$

Dans les deux précédentes équations, $\overline{mx1}$ est la moyenne de $mx1$:

$$\overline{mx1} = \frac{1}{Nd} \sum_{l=1}^{Nd} mx1_l \quad (85)$$

On définit de la même façon CoeffCorrY (pour $my1$ et $my2$) et CoeffCorrZ (pour $mz1$ et $mz2$).

La mesure de similitude tridimensionnelle CoeffCorr3D entre $m1$ et $m2$ (matrices de taille $3 \times Nd$) est définie de la façon suivante :

$$\text{CoeffCorr3D}(\vec{m1}, \vec{m2}) = \frac{\text{cov}(\vec{m1}, \vec{m2})}{\sigma(\vec{m1})\sigma(\vec{m2})} \quad (86)$$

Voici ensuite distEuclX , le carré de la distance euclidienne monodimensionnelle entre les moments magnétiques $mx1$ et $mx2$, moyenné sur le nombre de dipôles :

$$\text{distEuclX}(mx1, mx2) = \frac{1}{Nd} \sum_{l=1}^{Nd} (mx1_l - mx2_l)^2 \quad (87)$$

On définit de la même façon distEuclY (pour $my1$ et $my2$) et distEuclZ (pour $mz1$ et $mz2$).

La distance tridimensionnelle distEucl3D entre $m1$ et $m2$ est définie de la façon suivante :

$$\text{distEucl3D}(\vec{m1}, \vec{m2}) = \frac{1}{3.Nd} \sum_{l=1}^{Nd} ((mx1_l - mx2_l)^2 + (my1_l - my2_l)^2 + (mz1_l - mz2_l)^2) \quad (88)$$

distEucl3D peut aussi s'écrire comme la moyenne des trois distances monodimensionnelles :

$$\text{distEucl3D}(\vec{m1}, \vec{m2}) = \frac{1}{3} (\text{distEuclX}(mx1, mx2) + \text{distEuclY}(my1, my2) + \text{distEuclZ}(mz1, mz2)) \quad (89)$$

Les distances distEuclX , Y , Z et distEucl3D ont de plus été déclinées avec une normalisation : elle consiste à diviser la distance par la variance des moments magnétiques. Nous avons observé que les dipôles n'ont pas le même ordre de grandeur ni la même variance selon le plan horizontal auquel ils appartiennent : nous avons donc calculé la variance séparément pour chaque hauteur de dipôles.

Soit Nh le nombre de hauteurs h de dipôles différentes dans la distribution dipolaire (ex. $Nh = 2$ si le modèle est composé de deux plans de dipôles à 0.5m et 1.5m de haut). On notera respectivement $mx(h)$, $my(h)$ et $mz(h)$ l'ensemble des moments magnétiques selon X , Y , et Z des dipôles situés à la hauteur h . $m(h)$ correspond à l'ensemble de $mx(h)$, $my(h)$ et $mz(h)$.

Quatre variances ont été calculées par hauteur h de dipôles sur l'ensemble des modèles dipolaires des signatures de mars 2012 : $\text{var}(mx(h))$, $\text{var}(my(h))$, $\text{var}(mz(h))$ et $\text{var}(m(h))$.

Voici distEuclNormX , distance monodimensionnelle normalisée entre les moments magnétiques m_{x1} et m_{x2} :

$$\text{distEuclNormX}(m_{x1}, m_{x2}) = \frac{1}{Nh} \sum_{h=1}^{Nh} \frac{\text{distEuclX}(m_{x1}(h), m_{x2}(h))}{\text{var}(m_x(h))} \quad (90)$$

On définit de la même façon distEuclNormY (pour m_{y1} et m_{y2}) et distEuclNormZ (pour m_{z1} et m_{z2}).

La distance distEuclNorm3D tridimensionnelle normalisée entre m_1 et m_2 est définie de la façon suivante :

$$\text{distEuclNorm3D}(\vec{m}_1, \vec{m}_2) = \frac{1}{Nh} \sum_{h=1}^{Nh} \frac{\text{distEucl3D}(m_1(h), m_2(h))}{\text{var}(m(h))} \quad (91)$$

Au final, douze distances différentes ont donc été testées : CoeffCorrX , Y , Z et 3D , distEuclX , Y , Z et 3D , et distEuclNormX , Y , Z et 3D . Tous les résultats présentés ci-après ont été obtenus avec un maillage dipolaire fin composé de deux plans de 25×7 dipôles à 0.5m et 1.5m de haut (distribution 3).

VI.5.d.2 Influence du maillage de capteurs sur l'axe latéral et du nombre de plans dipolaires considérés

Evaluons l'influence du nombre de capteurs latéraux conservés : les données de mars 2012 permettent d'avoir jusqu'à 9 capteurs sur l'axe latéral. Est-ce que toutes les informations apportées par ces capteurs sont utiles ? Jusqu'à quelle fréquence spatiale de capteurs sur l'axe latéral peut-on descendre sans impacter les performances de ré-identification ?

De plus, une fois la modélisation connue, est-il nécessaire de calculer la distance sur les deux plans de dipôles (à 0.5m et 1.5m de haut) ? Ou peut-on se contenter de ne la calculer que sur le plan à 0.5m ? En effet, les dipôles modélisés sur le plan 0.5m sont spatialement beaucoup plus concentrés que sur le plan 1.5m, et nous nous attendons donc à ce que les dipôles sur le plan 1.5m soient plus similaires d'un véhicule à l'autre. Notons également que lorsqu'un seul plan est considéré, la distance euclidienne normalisée est identique à la distance euclidienne non normalisée.

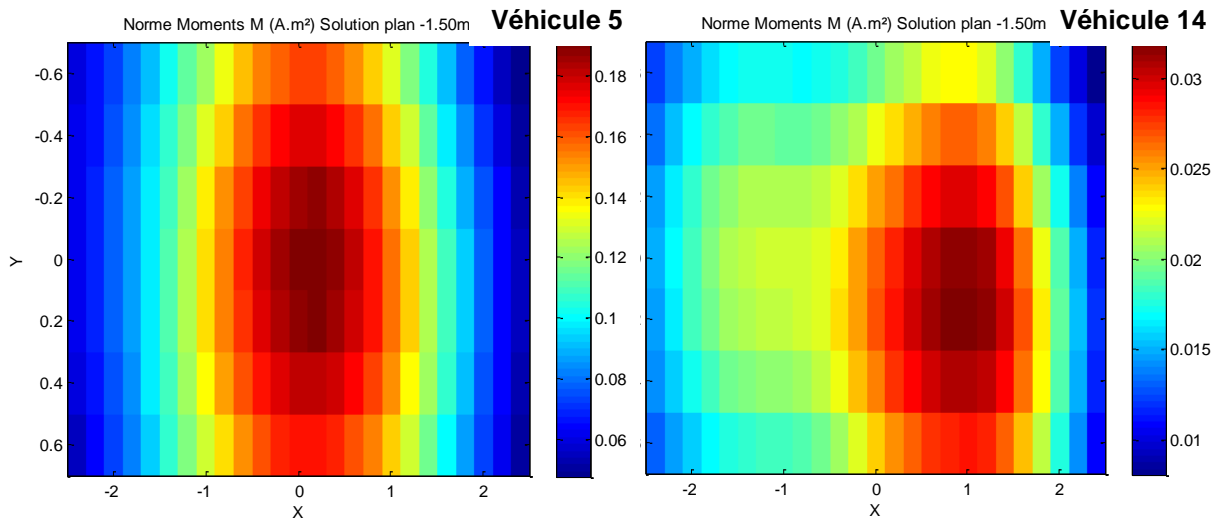


Figure 102 – Modélisation à 1.5m obtenue pour deux véhicules distincts

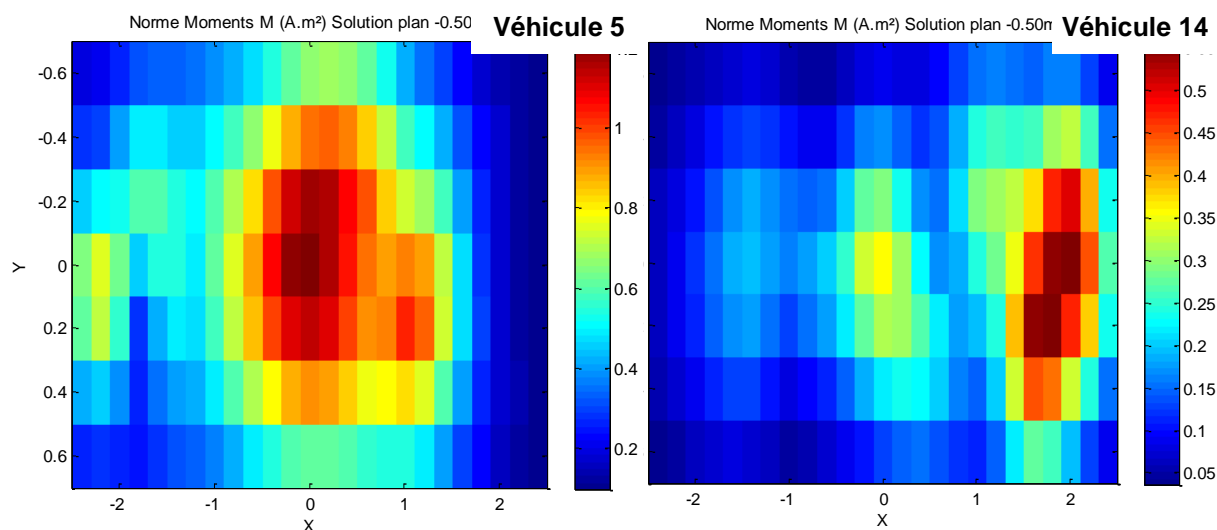


Figure 103 – Modélisation à 0.5m obtenue pour deux véhicules distincts : les dipôles sont plus ponctuels

Cette étude est menée sur les données de mars 2012, en utilisant de 9 à 2 capteurs sur la ligne de capteurs latéraux :

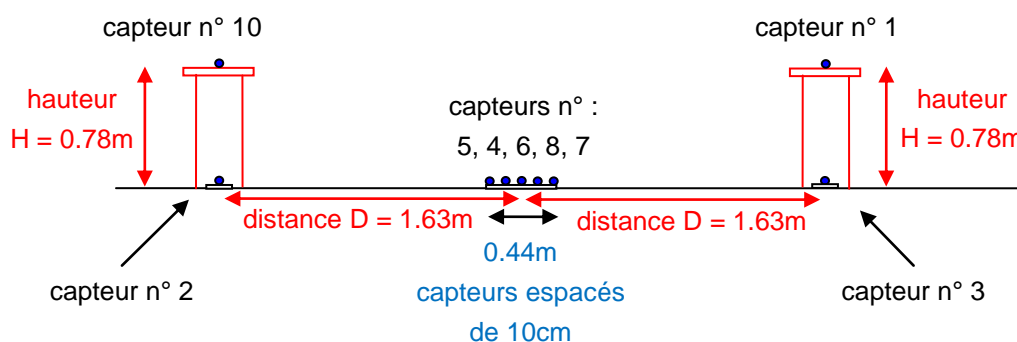


Figure 104 – Configuration des capteurs de mars 2012, vue de face, et leur numérotation

Nous allons également mesurer l'influence d'un changement d'orientation du véhicule sur ces performances : les données de mars 2012 permettent de comparer des signatures mesurées pour des passages vers le Nord et vers l'Est.

Seules les distances tridimensionnelles sont présentées dans le tableau ci-dessous car elles ont obtenu de meilleurs résultats que les distances monodimensionnelles (comme lors de la comparaison directe de paires de signatures mesurées).

Nombre de capteurs	Méthode	Distance sur 2 plans (0.5m et 1.5m)			Distance sur 1 plan (0.5m)		
		Orientation			Orientation		
		NN	EE	NE	NN	EE	NE
9 (n° 10, 2, 5, 4, 6, 8, 7, 3, 1)	Coeffcorr3D	98 %	77 %	64 %	100 %	77 %	64 %
	DistEucl3D	100 %	77 %	59 %	100 %	77 %	57 %
	DistEuclNorm3D	100 %	85 %	70 %			
5 (n° 2, 5, 6, 7, 3) espacés de 0.10m	Coeffcorr3D	98 %	77%	67 %	98 %	77 %	68 %
	DistEucl3D	100 %	79 %	56 %	100 %	79 %	56 %
	DistEuclNorm3D	100 %	85 %	61 %			
3 (n° 5, 6, 7) espacés de 0.20m	Coeffcorr3D	Identique 5 capteurs					
	DistEucl3D						
	DistEuclNorm3D						
2 (n°5, 7) espacés de 0.40m	Coeffcorr3D	96 %	81 %	64 %	96 %	77 %	66 %
	DistEucl3D	92 %	77 %	55 %	92 %	77 %	53 %
	DistEuclNorm3D	94 %	83 %	53 %			
1 (n°6)	Coeffcorr3D	100 %	75 %	55 %	100 %	75 %	55 %
	DistEucl3D	94 %	73 %	47 %	94 %	73 %	46 %
	DistEuclNorm3D	92 %	73 %	40 %			

Tableau 11 – Taux de bonnes détections pour un taux de fausses alarmes de 0%, obtenus par les méthodes de ré-identification comparées – Résultats sur les signatures de mars 2012, pour les passages à vitesse constante

Nous observons des performances identiques lors de la prise en compte de 3 à 9 capteurs latéraux : le taux de bonnes détections sans aucune erreur est de 77 à 100% sans changement d'orientation, et de 56 à 70% avec changement d'orientation. Le changement d'orientation du véhicule entre deux points de mesure entraîne donc une baisse d'environ 20% des performances, qui sont alors un peu faibles pour une application de ré-identification.

Il ne semble donc pas y avoir de perte d'information lorsque l'on supprime les 4 capteurs situés sur le côté de la route. En effet, passer de 9 à 5 capteurs n'entraîne aucune baisse des performances. Rappelons que les capteurs sur le côté de la route étaient situés à une distance de 1.63m (de l'ordre d'une demi-longueur du véhicule) par rapport au centre du véhicule, alors que les capteurs sous le véhicule étaient situés à une vingtaine de centimètres de son châssis métallique. Les capteurs de côté mesurent donc des signatures plus proches d'un véhicule modélisé par un seul dipôle que modélisé par un grand nombre de dipôles. De plus, les signatures mesurées sur le côté sont de moindre amplitude par rapport aux signatures mesurées sous le véhicule. La figure suivante illustre la différence entre une signature mesurée par un capteur central sous le véhicule, et par un capteur situé sur le côté du véhicule :

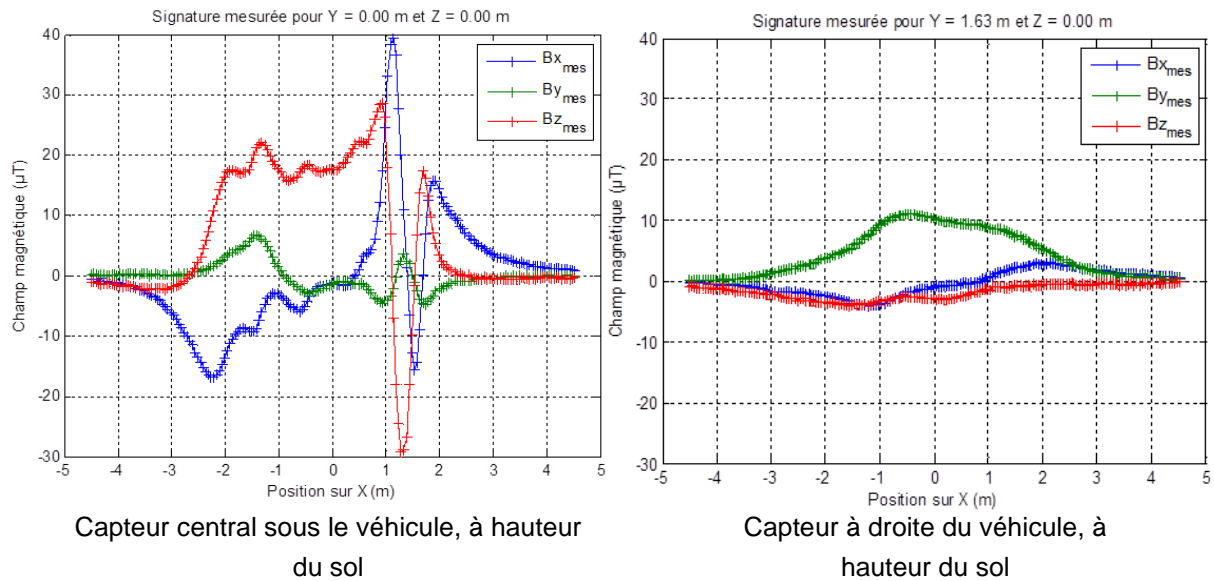


Figure 105 – Comparaison de deux signatures mesurées lors du même passage d'un véhicule par un capteur situé sous le centre du véhicule, et par un capteur situé sur le côté du véhicule. Les échelles des μT sont identiques.

Sur la figure ci-dessus, la signature mesurée par capteur central possède de nombreuses oscillations, indiquant la présence d'au moins cinq dipôles, alors que celle du capteur à droite du véhicule est moins accidentée, plus basse fréquence, et ressemble à celle de deux dipôles. Il est donc probable que les capteurs de côté n'apportent pas d'information assez précise pour calculer les moments magnétiques des nombreux dipôles du modèle, et que leur suppression ne change pas fondamentalement les modèles calculés.

Il ne semble pas y avoir non plus de perte d'information lorsqu'on passe d'un espacement de 0.10m à 0.20m sur Y entre les capteurs. En effet, passer de 5 à 3 capteurs n'entraîne aucune baisse des performances. L'information apportée par deux capteurs espacés de 0.10m est a priori redondante : en effet, la déformation des signatures après un décalage latéral de 0.10m était suffisamment faible pour que les performances de la méthode de ré-identification par comparaison directe de signatures ne soient que peu impactées par ce décalage. La figure suivante illustre cette faible variation.

On observe en effet sur la figure ci-dessous que les signatures mesurées par des capteurs espacés de 0.10m sont très similaires : un des capteurs n'apporte donc que très peu d'information. Il est donc probable qu'il ne soit pas nécessaire de conserver les signatures mesurées tous les 0.10m pour calculer le modèle magnétique du véhicule.

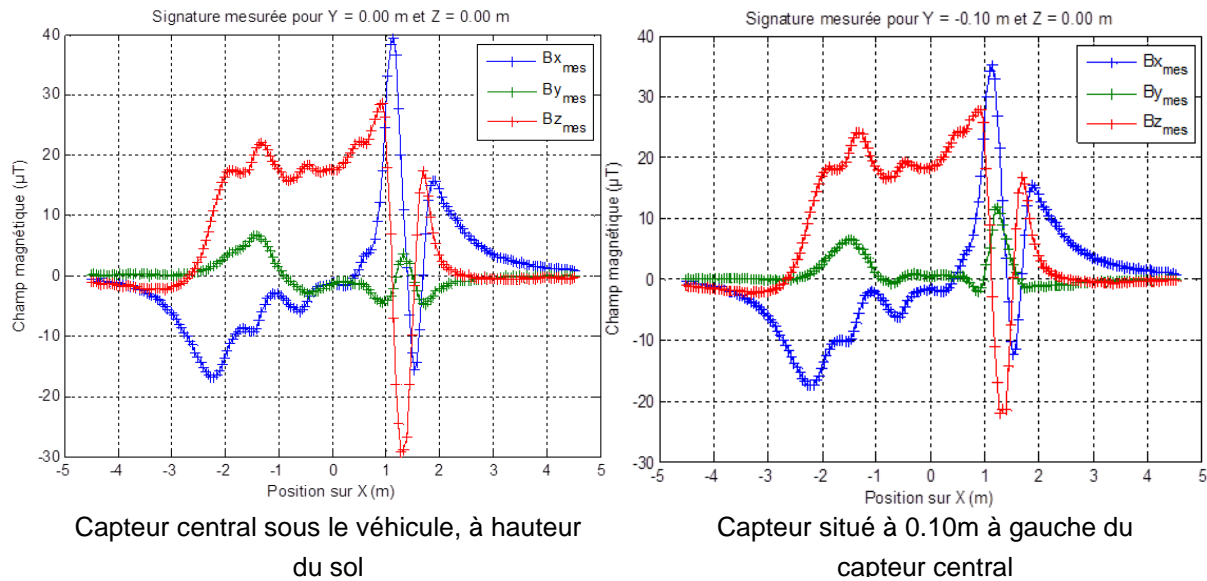


Figure 106 – Comparaison de deux signatures mesurées lors du même passage d'un véhicule par un capteur situé sous le centre du véhicule, et par un capteur situé 0.10m à gauche du capteur central. Les échelles des μT sont identiques.

Passer de 3 capteurs espacés de 0.20m à 2 capteurs espacés de 0.40m entraîne par contre une baisse de 4 à 8% des performances : sans changement d'orientation, le taux de bonnes détections sans aucune fausse alarme atteint 77 à 96%, et avec changement d'orientation 53 à 66%. C'est en particulier la distance euclidienne normalisée qui est impactée par la baisse du nombre de capteurs latéraux. Cette baisse des performances indique une légère perte d'information lors de la prise en compte des capteurs espacés de 0.40m. Cependant, la baisse reste très faible : nous pouvons donc conserver une configuration de capteurs espacés de 0.40m.

Les différentes distances calculées (distance euclidienne avec et sans normalisation, coefficient de corrélation) obtiennent des résultats similaires, mais légèrement en faveur du coefficient de corrélation. Dans le paragraphe suivant, nous continuerons de présenter les résultats obtenus par la distance euclidienne et par le coefficient de corrélation.

Comme supposé, la considération des moments magnétiques sur le plan 0.5m seul plutôt que sur les deux plans à 0.5m et 1.5m n'entraîne pas de baisse des performances de ré-identification, sauf si l'on prend en compte 9 capteurs : nous pouvons donc limiter les calculs de distance au seul plan à 0.5m de haut.

Notons que les résultats obtenus avec un seul capteur sont parfois meilleurs qu'avec deux capteurs lorsque le véhicule ne change pas d'orientation, mais cette amélioration n'est pas significative.

D'après ces premiers résultats, il semble donc que l'on puisse descendre à une fréquence d'un capteur tous les 0.4m selon l'axe Y, soit deux fois moins que dans le chapitre précédent où l'on comparait directement les signatures mesurées. Toutefois, les taux de ré-identification sans erreur lorsque le véhicule a changé d'orientation sont faibles (53 à 66%). Peut-on les améliorer ?

VI.5.d.3 Influence de l'orientation du véhicule et translations des plans dipolaires sur X et Y

Les changements d'orientation entraînent donc une baisse de 20% des taux de ré-identification. Peut-on limiter cette influence en ajoutant des translations du plan de dipôles selon X et selon Y avant le calcul de la distance ?

Il est en effet possible que deux signatures spatiales d'un même véhicule n'aient pas été segmentées exactement de la même façon entre deux passages, et que leurs deux distributions dipolaires s'en trouvent translatées selon l'axe X. Ainsi, si l'on compare directement les deux distributions de dipôles présentées dans la figure ci-dessous, leur distance sera grande. Mais si l'on autorise la comparaison entre la 1^{ère} distribution m1 et la 2^{ème} distribution m2 décalée de 0.4m sur l'axe longitudinal, leur distance sera beaucoup plus faible.

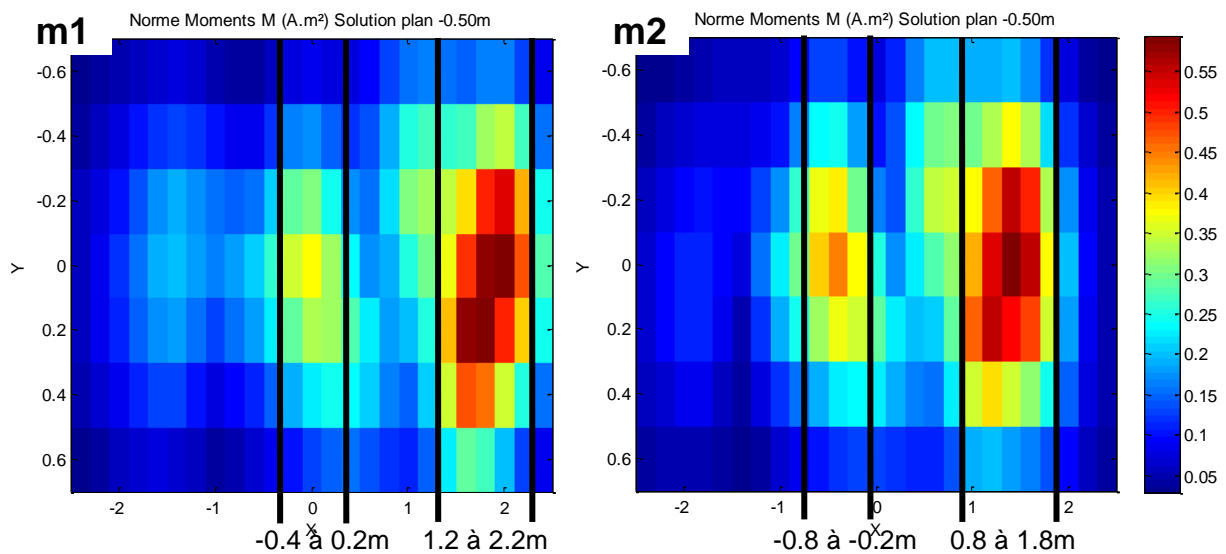


Figure 107 – Comparaison de deux modèles dipolaires obtenus pour deux passages du même véhicule : le 1^{er} orienté vers le Nord, le 2^{ème} orienté vers l'Est. Les moments sont visiblement translatés selon l'axe X.

Lorsque nous calculons la distance entre deux modèles dipolaires, nous autorisons trois décalages longitudinaux decX de la 2^{ème} distribution m2 : 0m, +0.20m, et -0.20m. Cela entraîne le calcul de trois distances pour chaque paire de modèles dipolaires :

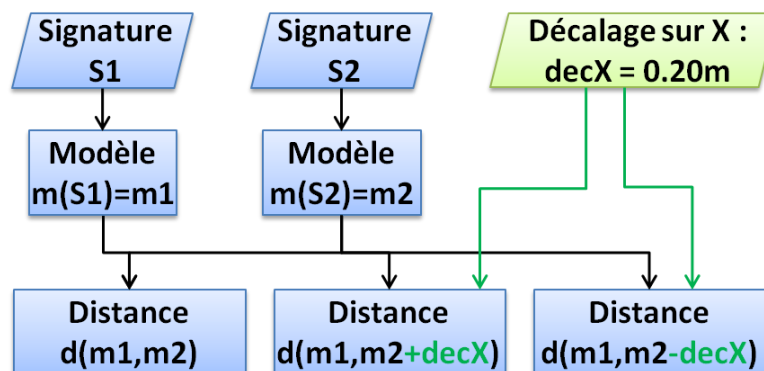


Figure 108 – Schéma du calcul de trois distances en cas d'autorisation d'un décalage longitudinal $\pm \text{decX}$ du modèle dipolaire m2.

Voici l'illustration de la zone des modèles dipolaires m1 et m2 qui est comparée lorsqu'on n'autorise aucun décalage longitudinal, puis lorsqu'on effectue un décalage decX de 0.20m sur m2 :

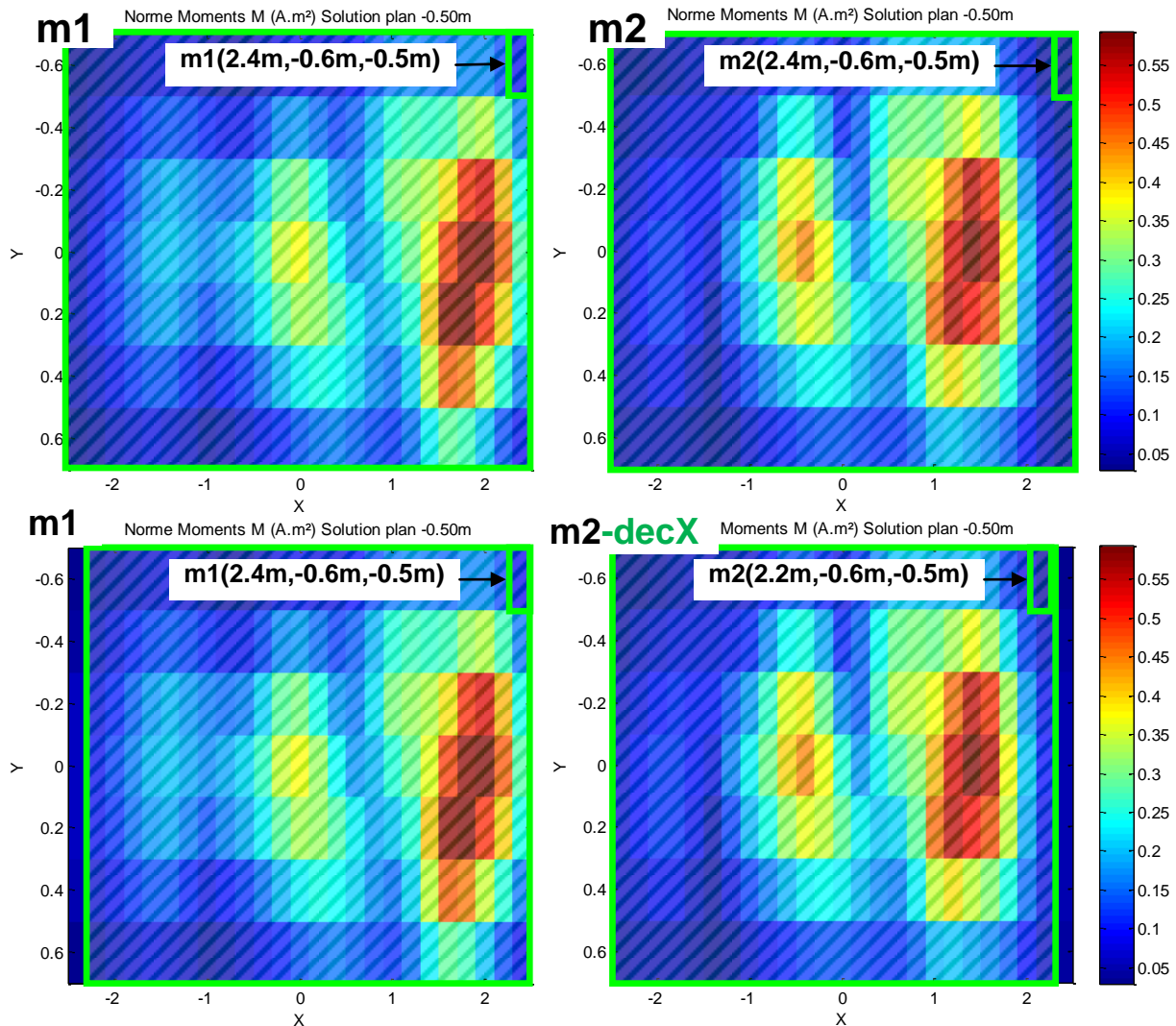


Figure 109 – Illustration des dipôles comparés lorsqu'on calcule la distance $d(m1, m2)$ et lorsqu'on calcule la distance $d(m1, m2 - \text{decX})$.

On ne compare plus directement deux à deux les dipôles de m1 et de m2 situés à la même position d_i du maillage dipolaire : on compare ici les $mx1_i$, $my1_i$ et $mz1_i$ du dipôle de m1 de coordonnées (2.4m, -0.6m, -0.5m) avec les $mx2_i$, $my2_i$ et $mz2_i$ du dipôle de m2 de coordonnées (2.2m, -0.6m, -0.5m).

On remarque qu'autoriser un décalage decX de 0.20m de la distribution dipolaire m2 (calculée à partir de la signature S2) entraîne la comparaison d'une ligne latérale de dipôles en moins : dans l'exemple ci-dessus, on n'utilise pas la ligne de dipôles de m1 située sur $X = -2.40\text{m}$, ni la ligne de dipôles de m2 située sur $X = 2.40\text{m}$.

Par ailleurs, si le véhicule a effectué un décalage latéral entre deux passages, les modèles dipolaires pourraient être traduits selon l'axe Y. Lorsque nous calculons la distance entre deux modèles dipolaires, nous testons donc également trois décalages latéraux decY de la 2^{ème} distribution

$m2$: 0m, +0.20m, et -0.20m. Cela entraîne le calcul de trois distances pour chaque paire de modèles dipolaires :

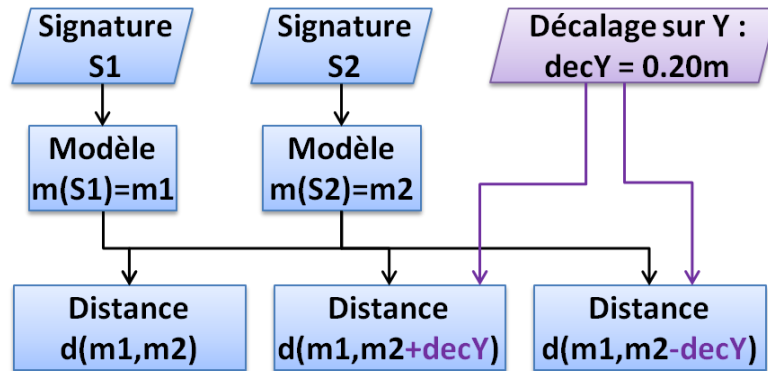


Figure 110 – Schéma du calcul de trois distances en cas d'autorisation d'un décalage latéral $\pm decY$ du modèle dipolaire $m2$.

Voici l'illustration de la zone des modèles dipolaires $m1$ et $m2$ qui est comparée lorsqu'on effectue un décalage $decY$ de 0.20m sur $m2$:

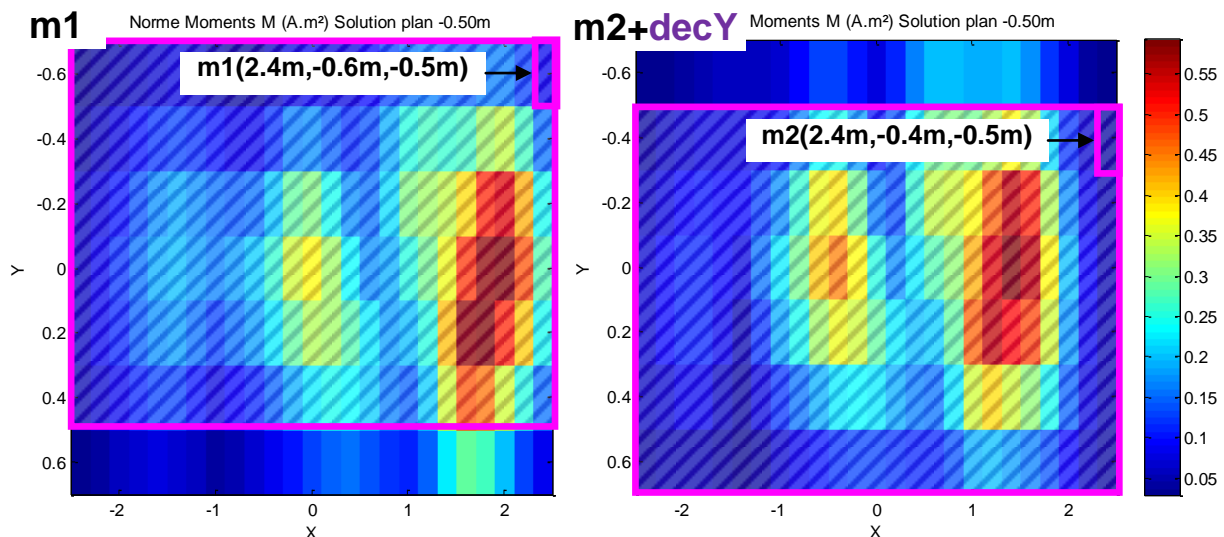


Figure 111 – Illustration des dipôles comparés lorsqu'on calcule la distance $d(m1,m2)$ et lorsqu'on calcule la distance $d(m1,m2+decY)$.

On ne compare plus directement deux à deux les dipôles de $m1$ et de $m2$ situés à la même position d_i du maillage dipolaire : on compare ici les $mx1_i$, $my1_i$ et $mz1_i$ du dipôle de $m1$ de coordonnées (2.4m, **-0.6m**, -0.5m) avec les $mx2_i$, $my2_i$ et $mz2_i$ du dipôle de $m2$ de coordonnées (2.4m, **-0.4m**, -0.5m).

A l'instar du décalage longitudinal $decX$, on remarque qu'autoriser un décalage latéral $decY$ de 0.20m de la distribution dipolaire $m2$ (calculée à partir de la signature $S2$) entraîne la comparaison d'une ligne longitudinale de dipôles en moins : dans l'exemple ci-dessus, on n'utilise pas la ligne de dipôles de $m1$ située sur $Y=0.60m$, ni la ligne de dipôles de $m2$ située sur $Y=-0.60m$.

Avec l'ajout de décalages longitudinaux $\pm \text{decX}$ et latéraux $\pm \text{decY}$ lors du calcul de la distance, nous testons donc 9 combinaisons de modèles dipolaires : m_1 est comparé avec m_2 , $m_2 + \text{decX}$, $m_2 - \text{decX}$, $m_2 + \text{decY}$, $m_2 - \text{decY}$, $m_2 + \text{decX} + \text{decY}$, $m_2 - \text{decX} + \text{decY}$, $m_2 + \text{decX} - \text{decY}$, et $m_2 - \text{decX} - \text{decY}$. La distance est alors définie comme la plus faible obtenue parmi les neuf décalages testés.

Le tableau ci-dessous indique les résultats obtenus en ajoutant progressivement des décalages. Les distances sont calculées uniquement sur le plan de dipôles à 0.50m de haut.

Nombre de capteurs	Méthode	Sans décalage			Avec $\pm \text{decX}$ (3 combinaisons)			Avec $\pm \text{decX}$ et $\pm \text{decY}$ (9 combinaisons)		
		Orientation			Orientation			Orientation		
		NN	EE	NE	NE	EE	NE	NN	EE	NE
3 (n° 5, 6, 7) espacés de 0.20m	Coeffcorr3D	98 %	77 %	68 %	100 %	94 %	79 %	100 %	100 %	82 %
	DistEucl3D	100 %	79 %	56 %	100 %	88 %	72 %	100 %	88 %	74 %
2 (n° 5, 7) espacés de 0.40m	Coeffcorr3D	96 %	77 %	66 %	96 %	92 %	74 %	100 %	96 %	74 %
	DistEucl3D	92 %	77 %	53 %	96 %	85 %	65 %	98 %	85 %	68 %

Tableau 12 – Taux de bonnes détections obtenus par les méthodes de ré-identification comparées – Résultats sur les signatures de mars 2012, pour les passages à vitesse constante – 0, 3 ou 9 décalages testés

L'ajout du décalage longitudinal seul permet de gagner en moyenne 10% et jusqu'à 17% sur le taux de bonnes détections sans erreur. L'ajout du décalage latéral permet de plus d'augmenter en moyenne ce taux de 2%.

Avec ces deux décalages et en gardant la configuration à deux capteurs espacés de 0.40m retenue dans le paragraphe précédent, le taux de bonnes détections sans aucune erreur atteint 96 à 100% sans changement d'orientation, et jusqu'à 74 % avec changement d'orientation. Le changement d'orientation du véhicule entre deux points de mesure entraîne donc toujours une baisse d'environ 20% des performances.

VI.5.d.4 Simulation de décalage latéral

Les tests précédents ont montré qu'une matrice de capteurs composée d'une ligne latérale de capteurs espacés de 0.40m permet une bonne ré-identification. Lorsque les capteurs sont espacés de 0.40m, le décalage Δy maximal du véhicule entre deux passages est de 0.20m (qui correspond au cas où la voiture est d'abord passée à la verticale d'un capteur, puis est ensuite passée entre deux capteurs). Ce décalage latéral entraîne une baisse des performances de la méthode de ré-identification par comparaison directe de paires de signatures car elle est très sensible aux déformations des signatures dues au décalage latéral du véhicule.

Nous souhaitons à présent vérifier que la méthode de ré-identification par modélisation est capable de remonter à la position, par rapport aux capteurs, des dipôles ayant généré la signature. Cette hypothèse initiale est en effet nécessaire pour justifier que cette deuxième méthode n'est pas ou peu sensible aux déformations dues au décalage latéral.

Nos données de janvier 2011 et mars 2012 ne permettent pas de simuler un décalage latéral du véhicule de 0.20m tout en ayant un espacement entre capteurs de 0.40m : on ne peut que simuler un décalage latéral de 0.20m avec une configuration de deux capteurs espacés de 0.20m. Or une telle

configuration obtient de faibles résultats de ré-identification, même sans décalage latéral. L'annexe VIII.2 présente tout de même notre essai de simulation de décalage latéral de 0.20m avec deux capteurs espacés de 0.20m sur une signature mesurée en mars 2012. Cet essai ne permet pas de conclure que le modèle dipolaire est bien lié au référentiel du véhicule, et donc que la modélisation remonte bien à la position des dipôles par rapport aux capteurs.

Sur des données simulées, nous souhaitons donc vérifier que le maillage de dipôles devrait permettre de s'affranchir du décalage latéral du véhicule Δy , ce qui était le but recherché de la mise en place d'une comparaison de modèles dipolaires plutôt que d'une comparaison directe des signatures mesurées.

Pour ce faire, nous avons simulé le passage d'un véhicule au-dessus de capteurs à l'aide d'un modèle simple, composé de trois dipôles dans le plan à hauteur 0.5m. Voici la représentation de leurs positions sur les axes X et Y, ainsi que des normes de leurs moments magnétiques (en A.m²) :

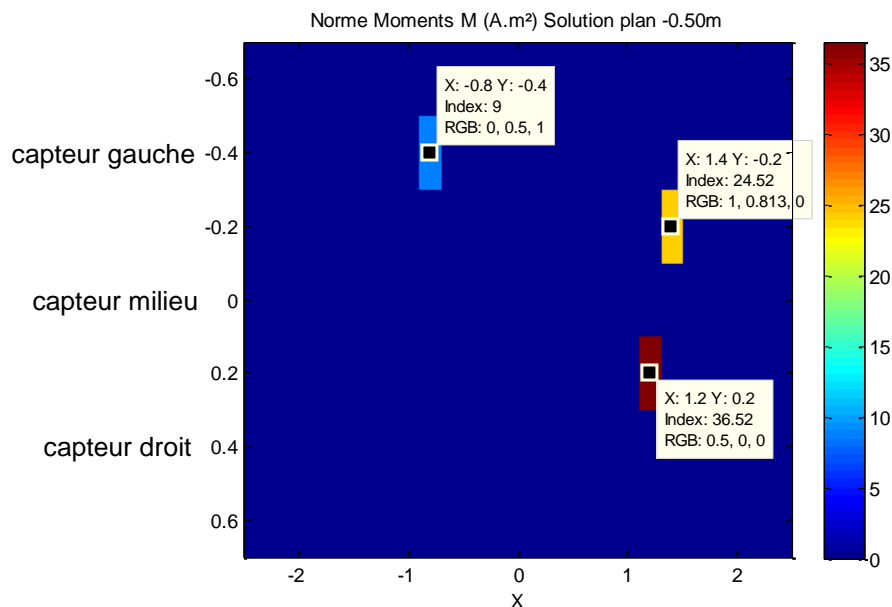


Figure 112 – Modèle à trois dipôles simulant un véhicule passant de façon centrée au-dessus des capteurs.

On se place alors dans une configuration de trois capteurs espacés de 0.40m sur l'axe latéral de la route, et l'on simule des passages du « véhicule » simulé : le 1^{er} passage est effectué de façon centrée par rapport au capteur milieu, puis le 2^{ème} passage correspond à un décalage latéral de +0.20m vers la droite par rapport au 1^{er} passage, et enfin le 3^{ème} passage correspond à un décalage latéral de -0.20m vers la gauche par rapport au 1^{er} passage.

Les champs mesurés par les trois capteurs dans le cas du 1^{er} passage centré sont représentés dans la figure suivante :

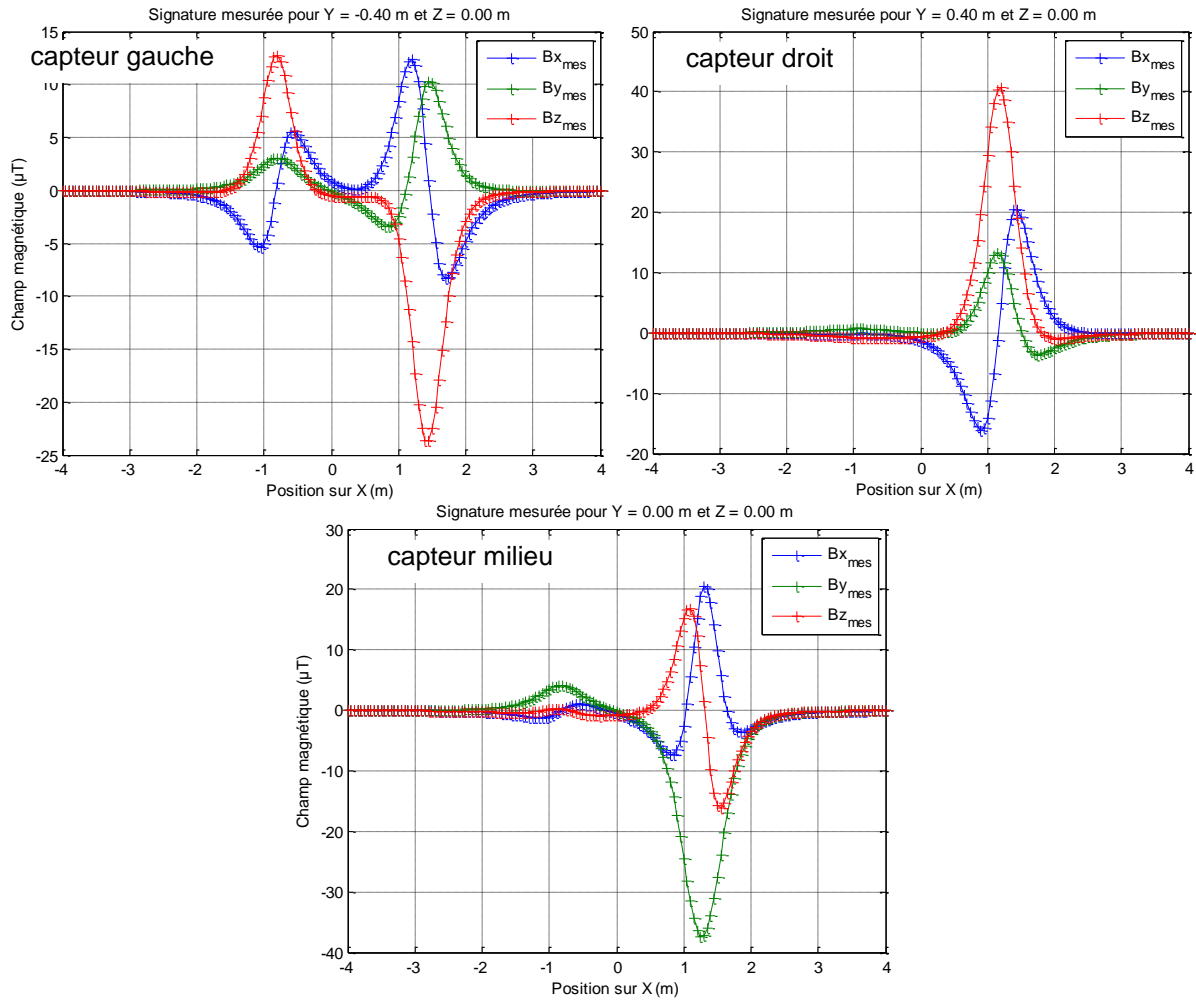


Figure 113 – Signatures simulées pour un véhicule passant de façon centrée au-dessus des capteurs.

Voici le modèle calculé par résolution du problème inverse avec une régularisation de Tikhonov, à partir des champs mesurés par les trois capteurs, en supposant que le véhicule était centré au-dessus des capteurs :

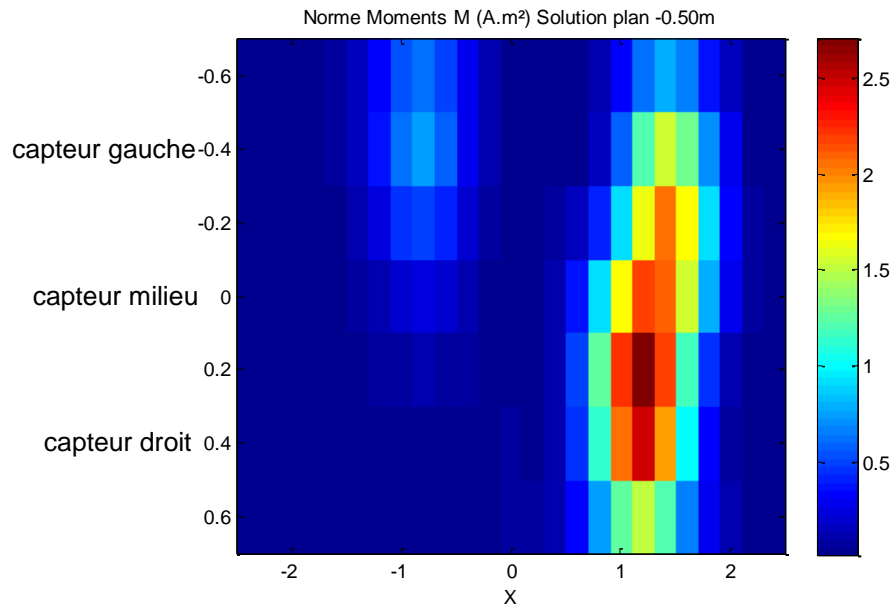


Figure 114 – Modèle dipolaire calculé à partir des signatures simulées d'un modèle à 3 dipôles, par les capteurs gauche, milieu et droit espacés de 0.40m.

Notons qu'entre autre avec l'ajout de la régularisation, nécessaire pour stabiliser le problème, on ne remonte pas exactement au modèle ayant généré les signatures. Cependant, on retrouve des dipôles de norme plus importante au niveau des emplacements des dipôles du modèle initial.

Simulons à présent un décalage latéral du véhicule de +0.20m sur la droite par rapport au 1^{er} passage. Le modèle passant au-dessus des capteurs et générant les signatures devient le suivant :

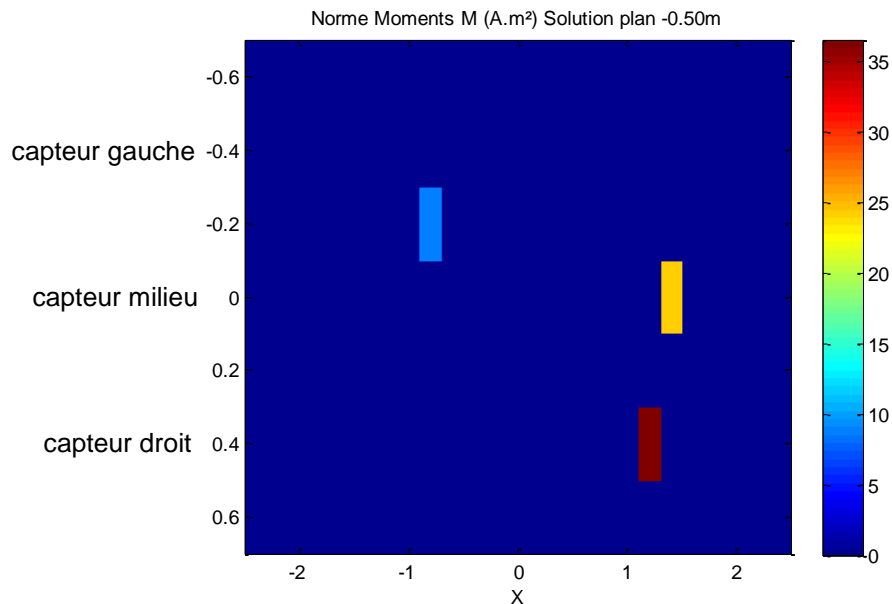


Figure 115 – Modèle à trois dipôles simulant un véhicule passant de façon décalée de +0.20m au-dessus des capteurs.

Les champs mesurés par les trois capteurs dans le cas du 2^{ème} passage décalé vers la droite sont représentés dans la figure suivante :

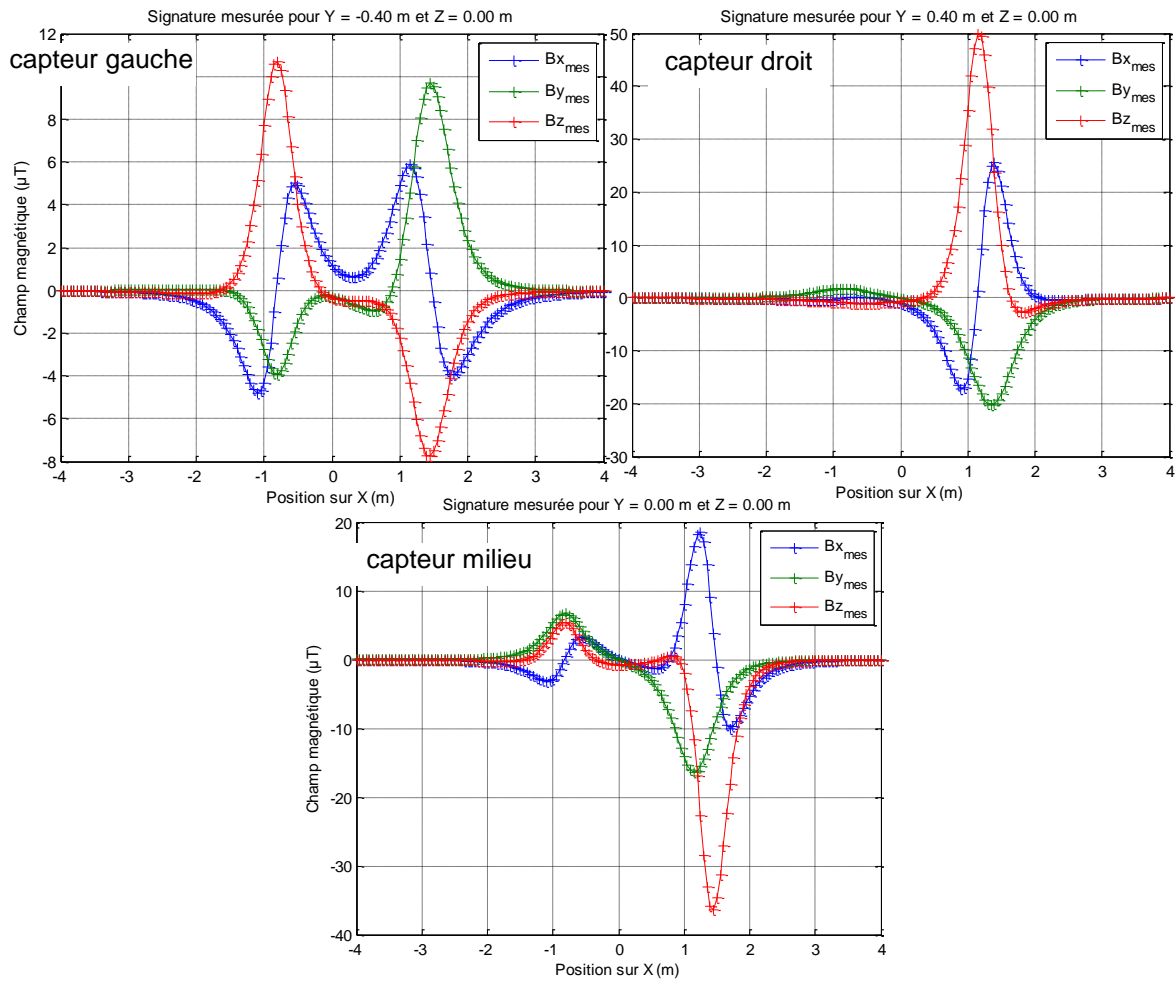


Figure 116 – Signatures simulées pour un véhicule passant de façon décalée de +0.20m au-dessus des capteurs.

Voici à présent le modèle calculé par résolution du problème inverse avec une régularisation de Tikhonov, à partir des champs mesurés par les trois capteurs, en supposant que le véhicule était décalé de +0.20m au-dessus des capteurs :

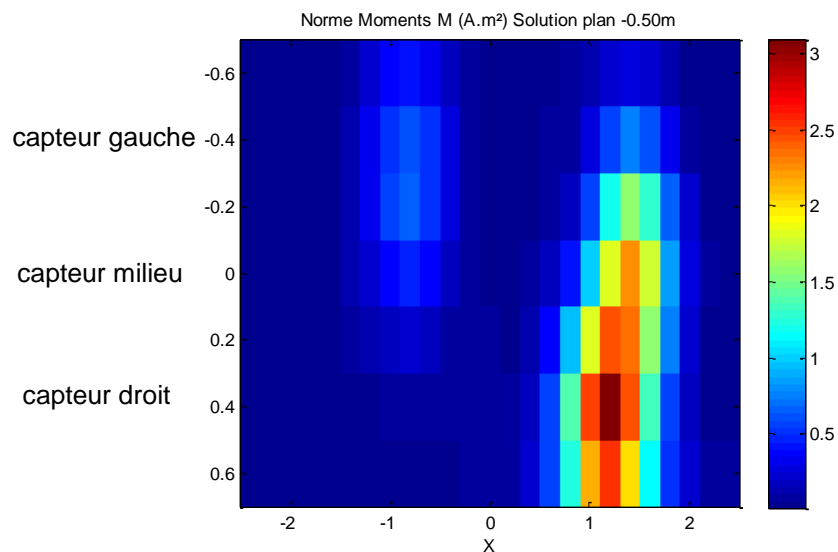


Figure 117 – Modèle dipolaire calculé à partir des signatures simulées d'un modèle à 3 dipôles, par les capteurs gauche, milieu et droit espacés de 0.40m.

Si l'on compare ce modèle à celui précédemment obtenu pour une simulation de véhicule centré, on observe de grandes similitudes entre les deux, à une translation de +0.20m près. Ce premier résultat semble bien montrer que les trois capteurs espacés de 0.40m sont capables de remonter à la position relative des dipôles par rapport aux capteurs.

Nous avons ensuite effectué une 3^{ème} simulation de décalage latéral vers la gauche de -0.20m par rapport au 1^{er} passage centré. Le modèle passant au-dessus des capteurs et générant les signatures devient le suivant :

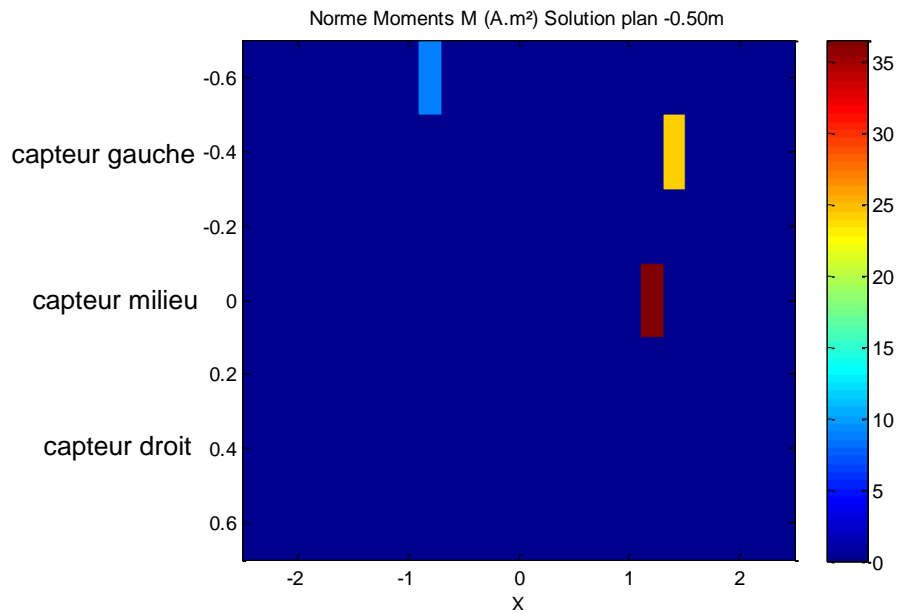


Figure 118 – Modèle à trois dipôles simulant un véhicule passant de façon décalée de -0.20m au-dessus des capteurs.

Les champs mesurés par les trois capteurs dans le cas du 3^{ème} passage décalé vers la gauche sont représentés dans la figure suivante :

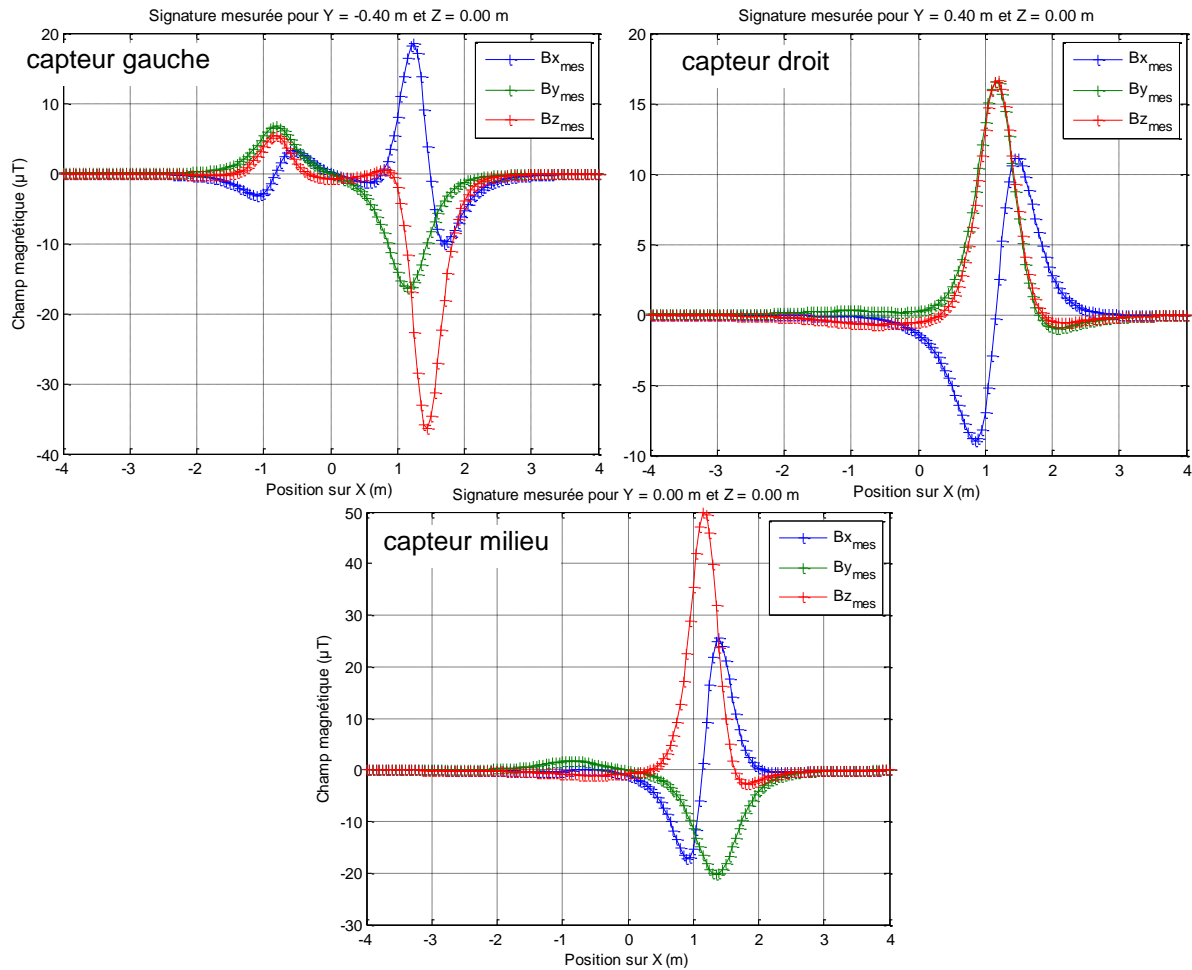


Figure 119 – Signatures simulées pour un véhicule passant de façon décalée de -0.20m au-dessus des capteurs.

Voici à présent le modèle calculé par résolution du problème inverse avec une régularisation de Tikhonov, à partir des champs mesurés par les trois capteurs, en supposant que le véhicule était décalé de -0.20m au-dessus des capteurs :

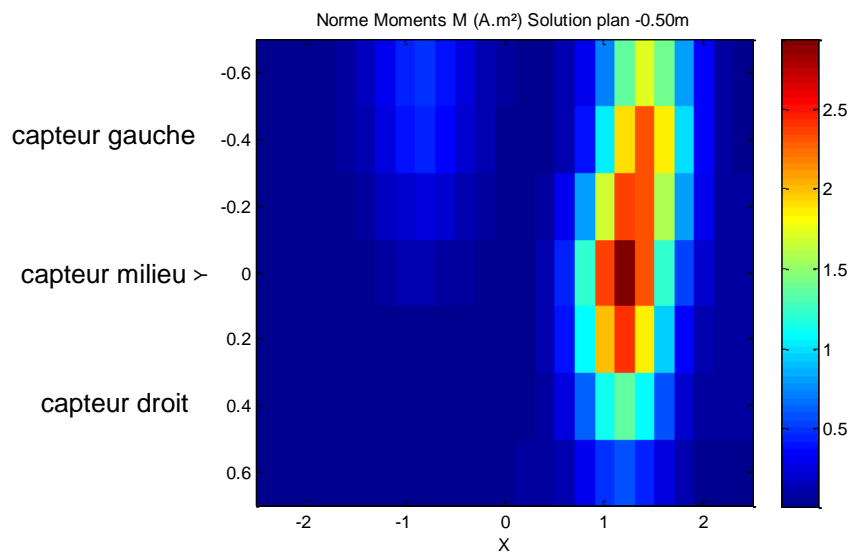


Figure 120 – Modèle dipolaire calculé à partir des signatures simulées d'un modèle à 3 dipôles, par les capteurs gauche, milieu et droit espacés de 0.40m.

Si l'on compare ce modèle à celui précédemment obtenu pour une simulation de véhicule centré, on observe également de grandes similitudes entre les deux, à une translation de -0.20m près. Si la comparaison se fait entre le modèle obtenu pour un décalage de +0.20m et celui obtenu pour un décalage de -0.20m, la translation est cette fois de 0.40m. Ce nouveau résultat semble bien confirmer que les trois capteurs espacés de 0.40m sont capables de remonter à la position relative des dipôles par rapport aux capteurs.

En comparant visuellement les modèles obtenus avec les différents décalages latéraux, nous observons bien un phénomène de translation latérale du modèle magnétique en fonction du décalage latéral. Le modèle calculé par résolution du problème inverse semble donc lié au référentiel du véhicule (et pas au référentiel des capteurs) : la modélisation remonte bien à la position des dipôles par rapport aux capteurs. Le décalage latéral Δy effectué lors du calcul de distance entre m_1 et m_2 pour rechercher un maximum de corrélation spatiale devrait alors permettre de s'affranchir du décalage latéral Δy du véhicule.

De nouvelles expérimentations avec une configuration de capteurs espacés de 0.40m seront nécessaires pour confirmer sur des données réelles ces résultats très prometteurs obtenus en simulation.

VI.5.e Comparaison des performances des deux méthodes de ré-identification proposées

Avant de conclure sur les performances obtenues par la méthode de ré-identification par comparaison de paires de modèles magnétiques de véhicules, comparons-les à celles obtenues dans le chapitre précédent par la méthode de comparaison directe de paires de signatures magnétiques.

L'impact des paramètres suivants sur les performances a été étudié dans le chapitre précédent :

- Changement d'orientation du véhicule par rapport au champ magnétique terrestre,
- Décalage latéral du véhicule entre les deux passages au-dessus des capteurs, lié à l'espacement maximal entre deux capteurs latéraux,
- Accélération du véhicule lors du passage au-dessus des capteurs (étude non reprise dans ce chapitre).

Les principaux résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant :

Données	Capt1 / Capt2	Moyenne signatures même orientation	Moyenne signatures d'orientations différentes	Ecart dû au changement d'orientation
Mars2012	1 à 5 / 1 à 5 = 1 capteur / 0.10m	99%	99%	0%
	1,3,5 / 2,4 = Simu. 1 capt. / 0.20m	95%	93%	-2%
	Ecart dû au décalage latéral $\Delta y = 0.10m$	-4%	-6%	

Données	Capt1 / Capt2	Moyenne signatures même orientation	Moyenne signatures d'orientations différentes	Ecart dû au changement d'orientation
Janv. 2011	Central / Central = Sans décalage latéral	97%	82%	-15%
	Central / G,D = Simu. 1 capt. / 0.50m	39%	36%	-3%
	Ecart dû au décalage latéral $\Delta y = 0.25m$	-58%	-46%	

Tableau 13 – Bilan des Taux de bonnes détections sans aucune erreur obtenus par la méthode de comparaison directe de paires de signatures avec la distance euclidienne tridimensionnelle pour différentes paires de capteurs autorisées

Avec une ligne latérale de capteurs espacés de 0.2m, la ré-identification de véhicules par comparaison de signatures spatiales magnétiques est possible avec une distance euclidienne tridimensionnelle : sans changement d'orientation ni décalage latéral Δy du véhicule entre deux passages, le taux de ré-identification sans aucune erreur est en moyenne de 97%. Un changement d'orientation du véhicule ne baisse ses performances que de 15%.

Les performances de la distance euclidienne sont par contre très sensibles à un décalage latéral du véhicule d'un site de mesure à l'autre : avoir un capteur tous les 0.5m entraîne une chute des performances de 97% à 39%. Cette méthode de ré-identification nécessite donc de positionner un capteur tous les 0.20m sur toute la largeur de la voie.

Pour faciliter la comparaison avec la méthode de ré-identification via une modélisation magnétique, nous ne reprenons ici que les résultats obtenus avec la distance tridimensionnelle s'appuyant sur les coefficients de corrélation (sans indiquer ceux de la distance euclidienne tridimensionnelle, qui sont en moyenne moins bons de 5% sur les données de mars 2012).

Données	Nombre de capteurs	Largeur de chaussée entre les capteurs des extrémités	Coeffcorr3D avec $\pm decX$ et $\pm decY$		Ecart dû au changement d'orientation
			moy(NN,EE)	NE	
Mars 2012	5 (n° 2, 5, 6, 7, 3) espacés de 0.10m	0.40m	100%	82%	-18%
	3 (n° 5, 6, 7) espacés de 0.20m	0.40m	100%	82%	-18%
	2 (n° 4, 8) espacés de 0.20m	0.20m	92%	52%	-40%
	2 (n° 5, 7) espacés de 0.40m	0.40m	98%	74%	-24%
Janv. 2011	2 (G,D) espacés de 0.50m	0.50m	85%	70%	-15%

Tableau 14 – Bilan des Taux de bonnes détections sans aucune erreur obtenus par la méthode de comparaison de modèles dipolaires avec les coefficients de corrélation tridimensionnels pour différentes configurations de capteurs

Avec une ligne latérale de trois capteurs espacés de 0.2m, la ré-identification de véhicules par comparaison de modèles magnétiques est également possible : sans changement d'orientation ni a priori décalage latéral Δy du véhicule entre deux passages, le taux de ré-identification sans aucune erreur est en moyenne de 100%. Un changement d'orientation du véhicule ne baisse ses performances que de 18%. Cette méthode est donc légèrement plus sensible que la précédente aux changements d'orientation du véhicule, mais cette sensibilité reste limitée.

En plus d'indiquer l'espacement entre les capteurs latéraux, nous avons également écrit la distance maximale qu'il y a entre le capteur le plus à gauche de l'axe latéral, et celui le plus à droite : cela quantifie la largeur de chaussée couverte par les capteurs. En effet, nous observons que dans le cas de la méthode de ré-identification par comparaison de modèles magnétiques, ce n'est pas uniquement l'espacement entre les capteurs qui est important, mais la surface qu'ils couvrent sur la largeur de la chaussée.

Ainsi, deux capteurs espacés de 0.2m obtiennent 92% de bonnes détections sans erreur si le véhicule n'a pas changé d'orientation, et seulement 52% de bonnes détections en cas de changement d'orientation, soit 30% de moins que la configuration avec 3 capteurs espacés de 0.2m.

A l'inverse, mettre plus de capteurs sur une même largeur de chaussée n'améliore pas obligatoirement les performances : ainsi, 3 capteurs espacés de 0.20m et couvrant donc 0.40m de chaussée obtiennent exactement les mêmes résultats que 5 capteurs espacés de 0.10m et couvrant donc la même largeur.

Avec cette deuxième méthode, nous observons alors que la ré-identification de véhicules est possible avec une ligne latérale de deux capteurs espacés de 0.4m : sans changement d'orientation ni a priori décalage latéral Δy du véhicule entre deux passages, le taux de ré-identification sans aucune erreur est en moyenne de 98%, et avec changement d'orientation, il est encore de 74%.

Un essai avec les données de janvier 2011 et une configuration de deux capteurs espacés de 0.5m semble même indiquer que la ré-identification par comparaison de modèles magnétiques pourrait être possible avec des capteurs espacés de 0.5m. Sans changement d'orientation, le taux de bonnes détections est de 85%, et de 70% avec changement d'orientation. Notons que la base de données de janvier 2011 comportait plus de véhicules que celle de mars 2012, ce qui peut expliquer la baisse du taux obtenu sans changement d'orientation.

Pour simuler l'influence du décalage latéral du véhicule sur les performances de cette deuxième méthode, nous avons pris un modèle de véhicule simplifié et composé de trois dipôles. Nous avons ensuite généré les champs mesurés par trois capteurs espacés de 0.40m au passage de ce modèle, pour trois positions latérales différentes : centrée, décalée à gauche de -0.20m, et décalée à droite de +0.20m. Ces signatures simulées ont été mises en entrée de l'algorithme de ré-identification.

Nous avons alors observé que l'algorithme était capable de remonter à la position des dipôles par rapport aux capteurs : en effet, les modèles obtenus sont bien translatés en fonction de la position du véhicule simulé au-dessus des capteurs.

Par rapport à la méthode de ré-identification par comparaison directe de paires de signatures, la méthode de ré-identification par comparaison de paires de modèles magnétiques permet donc de diviser pratiquement par deux le nombre de capteurs nécessaires pour obtenir des taux de bonnes

détections de plus de 70%, même en cas de changement d'orientation du véhicule entre les deux points de mesure. En effet, si l'on couvre la largeur de la route par une ligne de capteurs espacés de 0.40m plutôt que 0.20m, il faudra prévoir 10 capteurs par site de mesure (9 pour couvrir 3.20m de chaussée, et 1 pour estimer la vitesse). Si l'on limite la largeur de chaussée couverte à 1.6m (comme dans le chapitre précédent), le nombre de capteurs passe à 5 plus 1, soit 6 capteurs en tout.

Ces résultats peuvent être atteints car cette deuxième méthode peut prendre en compte le décalage latéral du véhicule.

VI.5.f Méthode de ré-identification proposée et conclusions

Dans ce chapitre, nous avons abordé une nouvelle approche de comparaison de signatures magnétiques. Plutôt que de comparer directement les signaux, ils nous ont servi à remonter à une modélisation dipolaire des véhicules par résolution d'un problème inverse linéaire : connaissant la position des dipôles dans l'espace, nous avons calculé leurs moments magnétiques.

Pour pouvoir modéliser parfaitement les signatures mesurées, nous avons proposé une distribution dipolaire composée de deux plans de dipôles, l'un à 0.50m de haut et l'autre à 1.50m de haut. Le plan le plus bas permet de générer les fréquences les plus hautes de la signature spatiale magnétique, tandis que le plan le plus haut génère les fréquences les plus basses de la signature.

Pour pouvoir gérer des décalages latéraux des véhicules entre deux passages au-dessus des capteurs, nous avons proposé que chaque plan de dipôles soit maillé par un dipôle tous les 0.20m sur l'axe Y, et nous avons choisi la même fréquence de maillage sur l'axe X.

L'inconvénient de ce maillage complexe est son mauvais conditionnement avec les configurations de capteurs disponibles suite aux campagnes de mesures de janvier 2011 et mars 2012. Le seul paramètre que l'on peut faire varier sur ces configurations est l'écart Δx entre les capteurs sur l'axe X. Il a été choisi à 0.05m pour se placer dans la grande majorité des cas dans un problème surdéterminé plutôt que sous-déterminé.

Un mauvais conditionnement entraîne une instabilité du problème inverse : une petite erreur sur le champ mesuré entraîne une grosse erreur sur les moments magnétiques calculés. Or dans une application de ré-identification, l'erreur sur le champ mesuré proviendra des légères modifications de la signature d'un même véhicule, due à un décalage latéral différent, ou à un changement d'orientation.

Il est donc nécessaire de rendre le problème plus stable en ajoutant une régularisation : nous avons choisi d'appliquer celle de Tikhonov, en contraignant les moments magnétiques à être de norme minimale. Cette contrainte a dû être fortement pondérée pour obtenir les meilleurs taux de ré-identification, ce qui est cohérent avec le très mauvais conditionnement de notre configuration de capteurs et dipôles.

Deux types de distances entre modélisations dipolaires ont été testés : l'un reposant sur le coefficient de corrélation, et l'autre sur la distance euclidienne. Leurs résultats sont proches et légèrement en faveur du coefficient de corrélation. Comme dans le précédent chapitre, les distances tridimensionnelles sont plus efficaces que les distances monodimensionnelles. Nous avons de plus montré que calculer la distance uniquement en comparant les moments magnétiques obtenus pour les dipôles à 0.50m de haut suffisait pour évaluer la distance entre deux modèles dipolaires sans diminuer

les performances de ré-identification (le plan de dipôles à 1.50m de haut sert alors uniquement à expliquer les composantes basse fréquence des signatures, pour permettre aux dipôles à 0.50m d'expliquer seulement les hautes fréquences).

Pour compenser une éventuelle variation de la segmentation de la signature magnétique d'un même véhicule, nous avons autorisé la comparaison entre les modèles dipolaires décalés de + ou - 0.20m sur l'axe X longitudinal (décalage decX). Pour compenser une éventuelle variation du décalage latéral Δy du véhicule, nous avons de plus autorisé la comparaison entre les modèles décalés de + ou - 0.20m sur l'axe Y latéral (décalage decY). La distance entre les deux modèles est alors définie comme la plus faible obtenue parmi les neuf décalages testés.

Les performances de ré-identification obtenues par la méthode proposée sont excellentes sans changement d'orientation du véhicule, et diminuent de 24% en cas de changement d'orientation. Cette méthode est donc un peu plus sensible au changement d'orientation du véhicule entre deux passages que la méthode de comparaison directe de paires de signatures magnétiques via le calcul d'une distance euclidienne (baisse de 15% en cas de changement d'orientation).

Cependant, ces performances sont obtenues avec des capteurs espacés latéralement de 0.40m, contre un espacement nécessaire de 0.20m dans le précédent chapitre. De plus, une 1^{ère} simulation de décalage latéral montre que la résolution du problème inverse linéaire permet bien de remonter à une modèle dipolaire fixe dans le repère du véhicule : en autorisant les modèles dipolaires à faire une translation selon l'axe Y avant d'être comparés, il devrait donc être possible de s'affranchir du décalage latéral.

Les performances de la méthode proposée dans ce chapitre sont donc moins sensibles au décalage latéral que les méthodes de comparaison directe de signatures, et une ligne de capteurs espacés de 0.40m devrait suffire pour l'application de ré-identification.

VII. Conclusions et perspectives

Au cours de cette étude, nous avons cherché à ré-identifier des véhicules à partir de leurs signatures magnétiques, dans le but de fournir aux gestionnaires de trafic des données, comme par exemple les temps de parcours ou les matrices origine-destination. Obtenir ces données en temps réel est une des clés d'une gestion dynamique du trafic.

Cette ré-identification s'est appuyée sur la construction de détecteurs capables de reconnaître les signatures venant d'un même véhicule, et de rejeter les signatures provenant de deux véhicules différents, à partir du calcul d'une distance. Les données de trafic ne seront ensuite calculées que sur les paires de signatures identifiées comme provenant d'un même véhicule.

Nos connaissances a priori des signatures magnétiques générées par l'aimantation des véhicules nous ont permis d'identifier deux verrous potentiels. Le 1^{er} concerne la présence d'une part d'aimantation induite par le champ magnétique externe au véhicule : si cette part est importante dans le plan horizontal, la signature du véhicule variera en fonction de son orientation par rapport au Nord magnétique terrestre, empêchant par exemple de ré-identifier un véhicule qui aura effectué un virage entre les deux points de mesure. Le 2^{ème} concerne la sensibilité des signatures à la position du véhicule sur l'axe latéral de la chaussée.

Pour obtenir des signaux nécessaires à notre étude, nous avons mené deux campagnes de mesures sur le site du CEA/Leti, impliquant une vingtaine de véhicules réels sur plusieurs jours. Deux configurations de capteurs magnétiques différentes ont été utilisées, et les véhicules sont passés au-dessus des capteurs avec plusieurs orientations par rapport au champ magnétique terrestre, ainsi que des vitesses lente ou rapide, et une accélération ou non.

Nous avons proposé deux méthodes pour ré-identifier des véhicules à partir des signatures magnétiques mesurées en deux points de mesure. Leurs performances ont été évaluées à partir des signatures mesurées lors des campagnes.

La 1^{ère} méthode compare les paires de signatures mesurées sans les transformer. Plusieurs distances ont été testées, et c'est la classique distance euclidienne tridimensionnelle qui a obtenu les meilleures performances : sans changement d'orientation du véhicule, 97% des paires de signatures provenant d'un même véhicule ont été reconnues comme telles sans faire d'erreur, donc sans qu'une seule paire de signatures de véhicules différents soit reconnue comme provenant d'un même véhicule. Avec un changement d'orientation du véhicule, 82% des paires de signatures provenant d'un même véhicule sont bien reconnues.

Avec cette 1^{ère} méthode, pour pallier à la déformation des signatures due au décalage latéral du véhicule, il est toutefois nécessaire de placer un capteur magnétique tous les 0.20m, idéalement sur toute la largeur de la chaussée sur chaque site de mesure, ce qui représente 19 capteurs. Nous faisons l'hypothèse que dans la pratique, la largeur couverte peut être réduite à 1.6m (soit la largeur couverte par le centre d'un véhicule qui reste dans sa voie), ce qui diminue le nombre de capteurs nécessaires à 10. La distance euclidienne est alors calculée sur la paire de capteurs dont les signatures obtiennent le maximum d'intercorrélation.

La 2^{ème} méthode que nous avons définie consiste à modéliser les véhicules par une distribution de dipôles magnétiques appartenant à deux plans horizontaux : cette configuration de dipôles permet d'expliquer les signatures mesurées, et doit permettre de s'affranchir du décalage latéral du véhicule. En effet, cette méthode est en théorie capable de remonter à la position, par rapport aux capteurs, des dipôles ayant généré la signature magnétique.

Le nombre de dipôles est fixé, et leur position par rapport aux capteurs connue. Nous résolvons donc un problème inverse linéaire : à partir des champs magnétiques mesurés, nous calculons les moments magnétiques des dipôles qui ont pu les générer. Compte-tenu de la configuration des capteurs et des dipôles, ce problème est instable et doit donc être régularisé.

Avec cette 2^{ème} méthode, ce ne sont pas les signatures qui sont comparées, mais leurs modèles dipolaires. Une configuration de deux capteurs espacés de 0.40m obtient alors 98% de bonne ré-identification des paires provenant d'un même véhicule si ce véhicule n'a pas changé d'orientation, et 74% s'il en a changé.

Une simulation de décalage latéral d'un véhicule de 0.20m vers la gauche puis vers la droite nous a permis d'extrapoler qu'une configuration avec un capteur tous les 0.40m sur la largeur de la chaussée doit effectivement permettre de s'affranchir du décalage latéral du véhicule. Cela représente 10 capteurs par site de mesure, nombre réduit à 6 si la largeur de chaussée couverte est limitée à 1.6m.

En comparaison, l'installation des 7 capteurs de Sensys Networks s'est d'abord faite tous les 0.15m [CHE07], puis tous les 0.30 à 0.40m [REM11, SAN11] pour des taux de ré-identification de 38% à 64% avec 7% d'erreurs. Notons qu'avec 7 capteurs, la chaussée n'est pas entièrement couverte. Avec la 2^{ème} méthode de ré-identification proposée, il semble que nous puissions conserver une installation de capteurs tous les 0.40m tout en améliorant le pourcentage de détection des paires de signatures provenant d'un même véhicule sans faire d'erreur.

La méthode de ré-identification par comparaison de paires de modèles magnétiques de véhicule nous semble donc plus prometteuse que la méthode de ré-identification par comparaison directe de paires de signatures magnétiques. Elle permet en effet de conserver de très bons taux de ré-identification sans aucune erreur, tout en divisant pratiquement par deux le nombre de capteurs nécessaires pour les atteindre.

En termes de coûts, nous souhaitons atteindre un système dont la somme des prix des capteurs et de leur installation dans la route était inférieure à 380 €, ce qui est le coût minimum d'installation d'une boucle inductive (Tableau 2 et Tableau 1). Compte-tenu du prix unitaire du type de capteur magnétique retenu dans cette étude, à savoir un AMR coûtant moins de 1 € pièce, auquel il faut ajouter le coût du système électronique pour transmettre l'information mesurée ainsi que le coût du génie civil pour l'installer, nous estimons le coût par capteur à 25 €. Avec 6 capteurs par site, le coût d'installation devrait donc être d'environ 150 €, soit au moins deux fois moins que celui d'une boucle inductive. De plus, les capteurs magnétiques semblent permettre d'atteindre des taux de ré-identification strictement supérieurs à ceux des boucles inductives, et équivalents à ceux des caméras CLAP, qui coûtent 10 fois plus cher qu'une matrice de capteurs magnétiques. Par ailleurs, les capteurs magnétiques peuvent être récupérés lors d'une réfection de chaussée, contrairement aux boucles inductives : leur coût d'entretien sera plus faible. Ils semblent donc très compétitifs par rapport aux autres technologies.

Grâce aux deux campagnes de mesures menées, et aux deux méthodes de ré-identification proposées, nous avons pu mettre en évidence un certain nombre de caractéristiques magnétiques des véhicules.

Tout d'abord, les signatures magnétiques mesurées dans un plan horizontal pour 16 à 25 véhicules se sont confirmées être assez différentes d'un véhicule à l'autre. Cela est très encourageant pour une application de ré-identification à partir de capteurs magnétiques placés dans la route, où une signature est considérée comme représentative et caractéristique d'un véhicule donné. En effet, cela semble indiquer que la part d'aimantation permanente dans le véhicule est plus importante que la part d'aimantation induite, ce qui était l'hypothèse initiale nécessaire pour faire de la ré-identification à partir de signatures magnétiques.

Lorsque le véhicule effectue un changement d'orientation par rapport au champ magnétique terrestre entre deux passages au-dessus des capteurs, les performances obtenues par nos algorithmes d'optimisation baissent relativement peu (de 15 à 24% en partant d'un taux de 97-98%). D'un point de vue magnétique, cela signifie que la somme des moments magnétiques permanents dans le plan horizontal et des moments magnétiques sur l'axe vertical est supérieure à la somme des moments magnétiques induits dans le plan horizontal. Cette caractéristique magnétique est également un point positif pour la ré-identification, en particulier dans une application aux carrefours : le changement d'orientation du véhicule entre deux points de mesure ne devrait donc pas entraîner de baisse significative des performances.

Dans l'état de l'art, plusieurs hypothèses avaient été faites sur les aimantations induite et permanente d'un véhicule. En s'appuyant sur des mesures réelles, [MAR78] proposait de modéliser un véhicule civil par un dipôle uniquement vertical et induit par le champ terrestre vertical, ce qui semble repris par [CHE07]. A l'inverse, sans présenter de signaux réels, [PHA97] proposait de modéliser un véhicule par un dipôle dans le plan horizontal uniquement, en distinguant une part induite (donc orientée Nord-Sud) et une part permanente. Sans présenter non plus de signaux réels, [LAO96] proposait de distinguer induit et permanent, avec un dipôle induit au centre du véhicule, et un dipôle permanent au niveau de chacun des deux essieux (soit trois dipôles en tout). Enfin, [ALT93, MER03, RCC03] apportaient une information sur l'aimantation des tanks, qui est majoritairement induite, mais provient d'un procédé appliqué volontairement lors de la fabrication des tanks, de façon à réduire au maximum l'aimantation permanente et ainsi à augmenter leur furtivité. Ils s'attendent donc à ce que l'aimantation permanente soit non négligeable pour les véhicules civils.

D'après nos résultats, la modélisation proposée par [PHA97] n'est valable que si sa part induite est très faible. Nos expérimentations ayant été menées sur le plan horizontal, il n'est ensuite pas possible de distinguer si les forts moments magnétiques verticaux (selon Z) sont induits ou permanents. Deux interprétations sont envisageables :

- Soit nous avons effectivement un moment majoritairement induit sur Z, ce qui corrobore les hypothèses de [MAR78] et [CHE07],
- Soit c'est le moment permanent qui est majoritaire sur Z, ce qui nous place plutôt dans l'hypothèse de [ALT93, MER03, RCC03] sur les véhicules civils.

La première interprétation n'est pas favorable à une application de ré-identification : cela signifie que deux véhicules de même marque et même modèle risquent de générer la même signature magnétique. Cependant, notons que la probabilité d'avoir deux véhicules identiques entre les deux

points de mesure utilisés pour la ré-identification est très faible, donc une aimantation majoritairement induite sur Z ne devrait pas avoir un impact important sur le taux de bonnes détections. Pour savoir quelle interprétation est la plus proche de la réalité, il faudra mesurer les signatures de deux véhicules sortant de la même chaîne de fabrication, ou effectuer de nouvelles mesures en ne restant cette fois pas dans le plan horizontal.

Ajoutons qu'il serait intéressant de comparer les modèles magnétiques obtenus avec la 2^{ème} méthode de ré-identification à partir de signatures magnétiques mesurées pour différentes orientations d'un même véhicule, même si la forte régularisation appliquée au problème inverse risque d'avoir lissé les différences entre les modèles. Cela pourrait permettre de dégager une tendance dans les orientations des dipôles (plutôt verticaux ? plutôt horizontaux ?) et de voir une éventuelle aimantation variant dans le même sens que le champ magnétique terrestre.

Si nous venons de rappeler que les performances ne sont que peu impactées par un changement d'orientation du véhicule, nous avons par contre observé une forte variation de la signature mesurée en fonction du décalage latéral du véhicule sur la chaussée. Lorsqu'on simule un décalage latéral du véhicule allant jusqu'à 0.25m (en simulant la présence de capteurs espacés de 0.50m sur toute la largeur de la chaussée), et que l'on calcule la distance entre paires de signatures, cela se traduit par une chute des performances de ré-identification de - 50 à - 60%. Il est donc recommandé de choisir une méthode de ré-identification permettant de s'affranchir de ce décalage latéral.

A la lecture des travaux de [FLA92], il serait intéressant de tester une 3^{ème} méthode de ré-identification sur les mesures à notre disposition. Après être remontés à une modélisation dipolaire des véhicules, on calcule les champs magnétiques qu'elle génère au niveau d'un plan de capteurs virtuels situés sous la route (donc plus éloignés du véhicule que les capteurs réels). En effet, si plusieurs distributions dipolaires peuvent générer les mêmes champs au niveau d'une configuration de capteurs donnée, et s'il y a donc potentiellement plusieurs solutions au problème inverse à résoudre, le « prolongement des champs » calculé sur ces capteurs virtuels est lui unique. Ici, le modèle dipolaire ne sert plus que de filtre physique des signaux mesurés. On obtient alors une carte en deux dimensions du champ magnétique généré par le véhicule, et la ré-identification se ferait par calcul de distance entre ces cartes.

A partir des mesures à notre disposition, il serait également intéressant de construire non plus un détecteur de paires de signatures provenant d'un même véhicule, mais de construire un algorithme qui apparie les signatures disponibles. En effet, dans une application réelle de ré-identification, il n'y aura dans la base de données que deux signatures provenant d'un même véhicule : une provenant du point de mesure A et l'autre du point de mesure B. Le principe de l'algorithme itératif serait le suivant : on apparie les deux signatures de la base de données ayant la plus petite distance (elles sont alors considérées comme provenant du même véhicule), puis on les élimine de la base, et on réitère la procédure.

De nouvelles expérimentations plus proches d'une ré-identification sur route réelle devront être réalisées pour confirmer les performances prometteuses obtenues dans notre étude. Il faudra en particulier prévoir de placer des capteurs espacés de 0.20m sur toute la largeur de la chaussée – ce qui permettra de tester également une configuration avec des capteurs espacés de 0.40m. Avec une

telle configuration de capteurs latéraux, il sera possible de vérifier nos hypothèses sur l'espacement minimal nécessaire entre capteurs pour s'affranchir du décalage latéral du véhicule. Cette configuration permettra également de vérifier que limiter à 1.60m la largeur de chaussée couverte par les capteurs ne dégrade pas les performances.

De plus, les mesures devront être cette fois réalisées en deux endroits différents, présentant des orientations différentes par rapport au champ magnétique terrestre. Cela permettra de mesurer l'impact des variations des sensibilités des capteurs (en fonction de la température ou des chocs magnétiques par exemple) et des variations des champs magnétiques locaux, tout en conservant la possibilité d'évaluer l'impact de la variation de l'orientation du véhicule lui-même.

Ensuite, pour simuler des situations plus réalistes de trafic, avec ou sans congestion, de plus grandes variations de vitesses et d'accélération, voire des arrêts du véhicule au-dessus des capteurs, devront être testés : les signatures mesurées lors de nos campagnes ne semblent pas avoir été déformées suffisamment par les différences de vitesse et d'accélération pour influencer les résultats obtenus par nos méthodes de ré-identification.

Avec de telles variations des vitesses de passage, notre méthode de segmentation des signatures devra être adaptée : elle consiste pour l'instant à un seuillage sur fenêtre glissante de taille fixe. Il faudra au minimum adapter la taille de la fenêtre à la vitesse estimée du véhicule. [LAN09] propose par ailleurs une méthode qui semble plus robuste, et qui repose sur une analyse temps/fréquence des signatures mesurées. Un filtre passe-bas est tout d'abord appliqué aux signaux, puis l'on détecte la présence d'une signature lorsqu'un seuil d'amplitude de fréquence est dépassé.

Enfin, l'influence de la présence de véhicules sur les autres voies lors des mesures de signatures magnétiques devra être étudiée. Ces véhicules voisins généreront un bruit magnétique variable qui pourra perturber le calcul de la distance entre deux passages d'un véhicule.

Notons que tous les taux de bonnes détections obtenus par nos deux méthodes de ré-identification ont été présentés avec un pourcentage d'erreur nul. Pour estimer les paramètres de trafic, il est possible d'accepter un très faible pourcentage d'erreur. Cela sera peut-être nécessaire dans le cas de mesures plus proches des conditions réelles de trafic.

VIII. Annexes

VIII.1 Expression du champ magnétique généré par un dipôle dans le cas d'un problème inverse linéaire

Nous repartons de l'expression du champ magnétique généré par un dipôle de moment magnétique \vec{m} et mesuré par un capteur situé à un vecteur \vec{r} :

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{3(\vec{m} \cdot \vec{r})\vec{r}}{\|\vec{r}\|^5} - \frac{\vec{m}}{\|\vec{r}\|^3} \right) \quad (92)$$

Rappelons que le vecteur \vec{r} , de composantes r_x , r_y et r_z supposées connues, est ainsi défini :

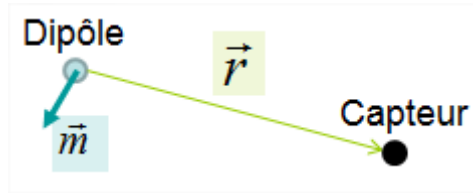


Figure 121 – Définition des origines des vecteurs \vec{r} et \vec{m} par rapport au dipôle et au capteur.

Rappelons également que $\vec{m} \cdot \vec{r} = m_x.r_x + m_y.r_y + m_z.r_z$ et détaillons chacune des composantes B_x , B_y , et B_z du champ \vec{B} :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \begin{bmatrix} \frac{3(m_x.r_x + m_y.r_y + m_z.r_z).r_x}{\|\vec{r}\|^5} - \frac{m_x}{\|\vec{r}\|^3} \\ \frac{3(m_x.r_x + m_y.r_y + m_z.r_z).r_y}{\|\vec{r}\|^5} - \frac{m_y}{\|\vec{r}\|^3} \\ \frac{3(m_x.r_x + m_y.r_y + m_z.r_z).r_z}{\|\vec{r}\|^5} - \frac{m_z}{\|\vec{r}\|^3} \end{bmatrix} \quad (93)$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{1}{\|\vec{r}\|^3} \begin{bmatrix} \frac{3(m_x.r_x + m_y.r_y + m_z.r_z).r_x}{\|\vec{r}\|^2} - m_x \\ \frac{3(m_x.r_x + m_y.r_y + m_z.r_z).r_y}{\|\vec{r}\|^2} - m_y \\ \frac{3(m_x.r_x + m_y.r_y + m_z.r_z).r_z}{\|\vec{r}\|^2} - m_z \end{bmatrix} \quad (94)$$

Factorisons ensuite les composantes m_x , m_y et m_z du moment magnétique :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{1}{\|\vec{r}\|^3} \begin{bmatrix} mx \cdot \left(\frac{3(rx.rx)}{\|\vec{r}\|^2} - 1 \right) + my \cdot \frac{3(rx.ry)}{\|\vec{r}\|^2} + mz \cdot \frac{3(rx.rz)}{\|\vec{r}\|^2} \\ mx \cdot \frac{3(rx.ry)}{\|\vec{r}\|^2} + my \cdot \left(\frac{3(ry.ry)}{\|\vec{r}\|^2} - 1 \right) + mz \cdot \frac{3(ry.rz)}{\|\vec{r}\|^2} \\ mx \cdot \frac{3(rx.rz)}{\|\vec{r}\|^2} + my \cdot \frac{3(ry.rz)}{\|\vec{r}\|^2} + mz \cdot \left(\frac{3(rz.rz)}{\|\vec{r}\|^2} - 1 \right) \end{bmatrix} \quad (95)$$

Ce qui peut également s'écrire sous la forme :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{1}{\|\vec{r}\|^3} \begin{bmatrix} \frac{3r_x^2}{\|\vec{r}\|^2} - 1 & \frac{3(r_x.r_y)}{\|\vec{r}\|^2} & \frac{3(r_x.r_z)}{\|\vec{r}\|^2} \\ \frac{3(r_x.r_y)}{\|\vec{r}\|^2} & \frac{3r_y^2}{\|\vec{r}\|^2} - 1 & \frac{3(r_y.r_z)}{\|\vec{r}\|^2} \\ \frac{3(r_x.r_z)}{\|\vec{r}\|^2} & \frac{3(r_y.r_z)}{\|\vec{r}\|^2} & \frac{3r_z^2}{\|\vec{r}\|^2} - 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} mx \\ my \\ mz \end{bmatrix} = C(\vec{r}) \cdot \vec{m} \quad (96)$$

C est une matrice symétrique dépendant uniquement de r.

VIII.2 Ré-identification via une modélisation magnétique - Simulation de décalage latéral sur données réelles

Sur les données de mars 2012, nous souhaitons vérifier par simulation que le maillage de dipôles devrait permettre de s'affranchir du décalage latéral du véhicule Δy .

Prenons un cas simple à un dipôle (simulant le véhicule), passant au-dessus de la plaque de 5 capteurs espacés de 0.1m. Au 1^{er} passage, le dipôle est à la verticale du capteur 2. Au 2^{ème} passage, il est à la verticale du capteur 4. Il y a alors eu un décalage latéral de $\Delta y = 0.2\text{m}$ entre les 2 passages.

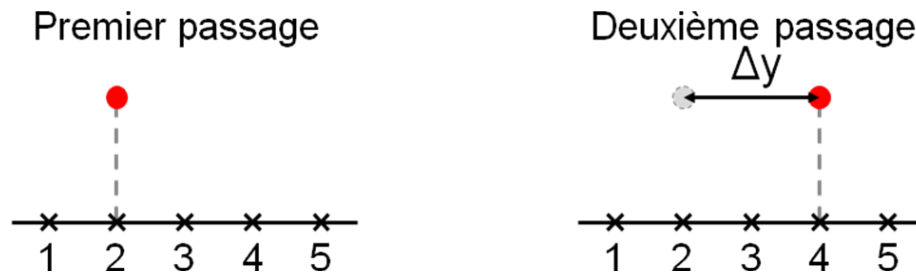


Figure 122 – Illustration d'un décalage latéral $\Delta y = 0.20\text{m}$ entre deux passages.

Nous n'avons à notre disposition que des signatures enregistrées pour une position inconnue des véhicules, mais nous pouvons supposer qu'elle est proche du centre de la plaque, ce qui correspond à un passage du dipôle au-dessus du capteur central 3. Comment simuler un décalage latéral du véhicule de $\Delta y = 0.20\text{m}$ avec ces données mesurées ?

Pour simuler un décalage latéral de 0.20m du véhicule entre deux passages avec les données de mars 2012, nous sommes obligés de comparer, pour une signature donnée, un 1^{er} modèle dipolaire calculé à partir des mesures des capteurs milieu (capteur 3) et droit (capteur 5), et un 2^{ème} modèle dipolaire calculé à partir des mesures des capteurs gauche (capteur 1) et milieu (capteur 3). Le 1^{er} couple de capteurs (3, 5) aura l'impression de mesurer un dipôle passant au-dessus du capteur le plus à gauche, tandis que le 2^{ème} couple de capteurs (1,3) aura l'impression de le mesurer au-dessus du capteur le plus à droite.

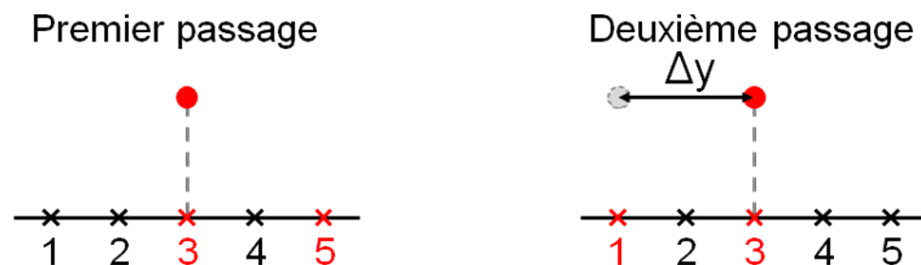


Figure 123 – Illustration de la simulation d'un décalage latéral de $\Delta y = 0.20\text{m}$, en prenant uniquement deux capteurs espacés de 0.20m.

L'inconvénient de résoudre le problème inverse linéaire avec uniquement deux capteurs espacés de 0.20m est le suivant : même sans simuler un décalage latéral Δy du véhicule, les performances de ré-identification sont de l'ordre de 50 à 60 % lorsqu'il y a changement d'orientation du véhicule, malgré

un calcul de la distance en autorisant un décalage longitudinal decX et latéral decY du modèle dipolaire $m2$ (calculé à partir de la signature $S2$).

Sans simuler de décalage latéral Δy du véhicule, le tableau ci-dessous rappelle en effet les résultats obtenus pour 3 capteurs espacés de 0.20m, et pour 2 capteurs espacés de 0.40m, puis présente ceux obtenus pour 2 capteurs espacés de 0.20m :

Nombre de capteurs	Méthode	Avec $\pm\text{decX}$ et $\pm\text{decY}$		
		Orientation		
		NN	EE	NE
3 (n° 5, 6, 7) espacés de 0.20m	Coeffcorr3D	100 %	100 %	82 %
	DistEucl3D	100 %	88 %	74 %
2 (n°5, 7) espacés de 0.40m	Coeffcorr3D	100 %	96 %	74 %
	DistEucl3D	98 %	85 %	68 %
2 (n° 4, 8) espacés de 0.20m	Coeffcorr3D	96 %	88 %	52 %
	DistEucl3D	96 %	85 %	57 %

Tableau 15 – Taux de bonnes détections obtenus par les méthodes de ré-identification comparées – Résultats sur les signatures de mars 2012, pour les passages à vitesse constante – Cas avec 2 capteurs espacés de 0.20m

Nous avons précédemment vu que passer de 3 capteurs espacés de 0.20m à 2 capteurs espacés de 0.40m entraîne une baisse de 0 à 4% des performances si le véhicule ne change pas d'orientation, et de 6 à 8% s'il en change. Si l'on passe à présent de 2 capteurs espacés de 0.40m à 2 capteurs espacés de 0.20m, les performances baissent encore de 0 à 8% si le véhicule ne change pas d'orientation, et de 11 à 22% s'il en change.

Cette baisse de performances peut s'expliquer par un conditionnement encore plus grand pour la configuration « 2 dipôles espacés de 0.20m » que pour la configuration « 2 dipôles espacés de 0.40m ». En effet, les deux dipôles espacés de 0.20m mesureront des champs plus similaires que ceux espacés de 0.40m, et leurs données seront donc plus corrélées.

Dans l'idéal, il aurait fallu pouvoir comparer les performances obtenues à partir de deux capteurs espacés de 0.40m, mais la configuration des capteurs lors de nos campagnes de mesures n'était pas suffisante pour le faire. Voici en effet la configuration minimale de capteurs nécessaire pour simuler un décalage latéral Δy de 0.20m du véhicule avec deux capteurs espacés de 0.40m :

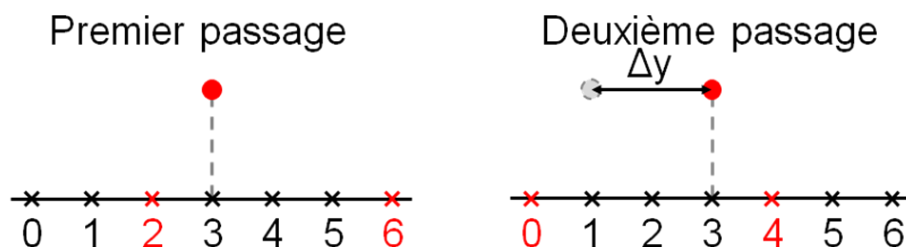


Figure 124 – Illustration de la configuration minimale de capteurs nécessaire pour simuler un décalage latéral de $\Delta y = 0.20\text{m}$ avec deux capteurs espacés de 0.40m.

On ne remontera donc pas aux performances de ré-identification de notre simulation de décalage latéral Δy du véhicule : on compare uniquement visuellement les modèles obtenus avec chaque paire de capteurs, pour vérifier que l'on observe bien un phénomène de translation latérale du modèle magnétique. Si l'on observe cette translation, alors le modèle calculé par résolution du problème inverse est bien lié au référentiel du véhicule (et pas au référentiel des capteurs). Le décalage latéral decY effectué lors du calcul de distance entre $m1$ et $m2$ devrait alors permettre de s'affranchir du décalage latéral $\Delta y = 0.20\text{m}$ du véhicule.

Pour avoir une référence du modèle sans simulation de décalage latéral, nous avons tout d'abord pris les trois capteurs gauche-milieu-droit espacés de 0.20m . Voici le modèle obtenu pour la distribution dipolaire espacée de 0.20m sur l'axe Y (distribution choisie dans les précédents paragraphes) :

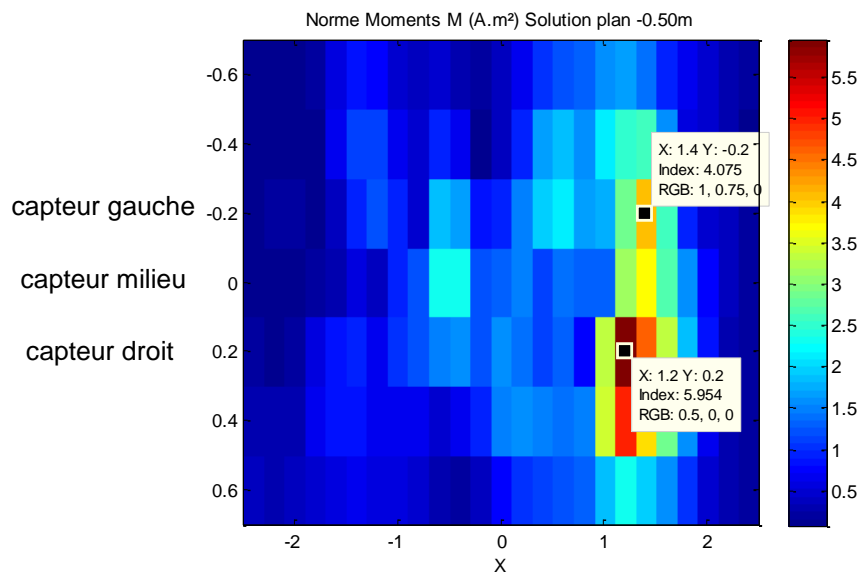


Figure 125 – Modèle dipolaire calculé à partir des signatures mesurées par les capteurs gauche, milieu et droit espacés de 0.20m . Les dipôles sont espacés de 0.20m sur l'axe Y .

Le modèle est principalement composé d'un dipôle situé à $Y=0.2\text{m}$ et dont la norme du moment magnétique vaut environ 6 A.m^2 , et d'un dipôle situé à $Y=-0.2\text{m}$ et dont la norme du moment magnétique vaut environ 4 A.m^2 . Ces deux dipôles principaux sont donc situés à la verticale des capteurs gauche et droit.

Dans l'hypothèse où le pas de 0.20m serait trop grossier pour voir une translation de 0.20m , nous l'avons également calculé en affinant la position des dipôles sur l'axe Y : la figure suivante présente le modèle obtenu en espaçant les dipôles de 0.10m sur l'axe Y . Notons que cette distribution a un conditionnement plus élevé que la précédente.

Le modèle obtenu est proche du précédent : on retrouve deux forts dipôles situés à $Y=0.2\text{m}$ et $Y=0.3\text{m}$, dont la norme du moment magnétique vaut environ 4 A.m^2 , et d'un dipôle situé à $Y=-0.2\text{m}$ et dont la norme du moment magnétique vaut environ 2 A.m^2 .

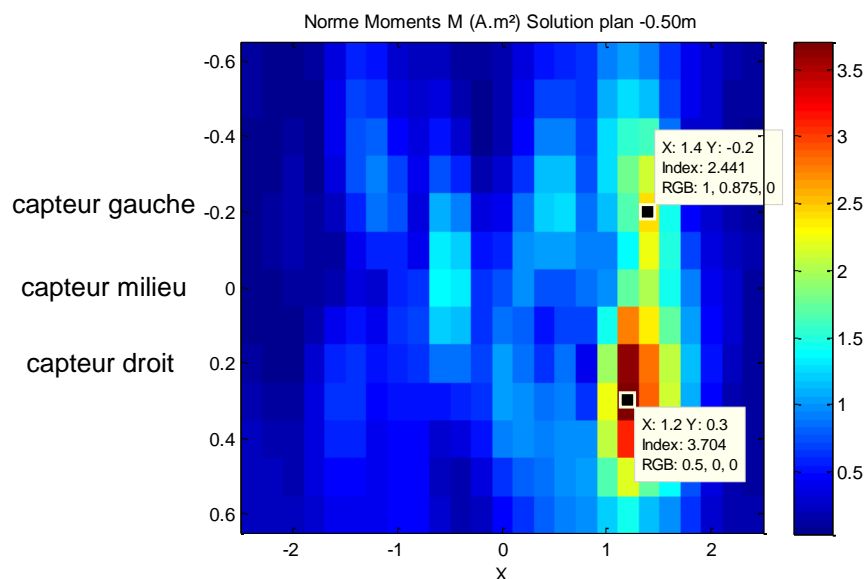


Figure 126 – Modèle dipolaire calculé à partir des signatures mesurées par les capteurs gauche, milieu et droit espacés de 0.20m. Les dipôles sont espacés de 0.10m sur l'axe Y.

Pour comparaison, voici le modèle dipolaire calculé à partir des capteurs gauche et droit, espacés de 0.40m :

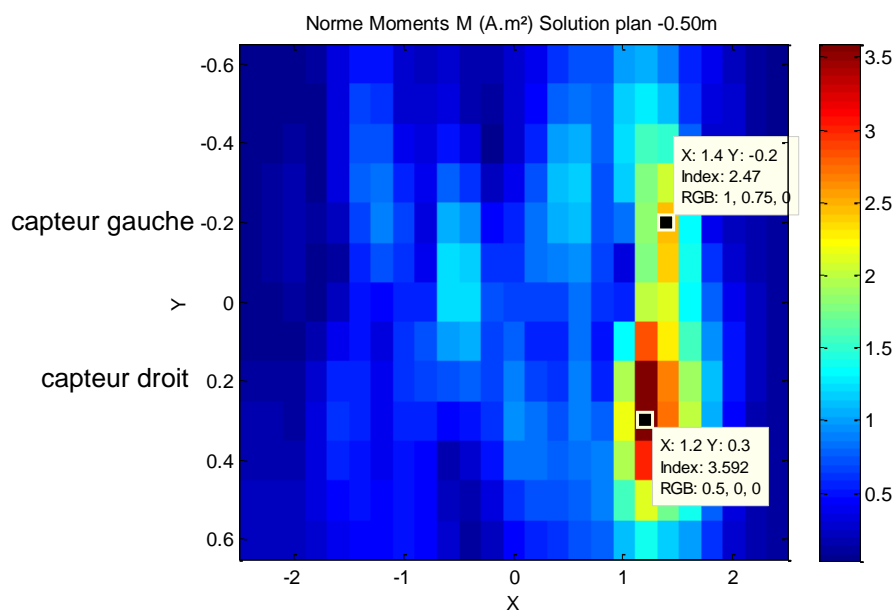


Figure 127 – Modèle dipolaire calculé à partir des signatures mesurées par les capteurs gauche et droit espacés de 0.40m. Les dipôles sont espacés de 0.10m sur l'axe Y.

Le capteur du milieu ne semble pas apporter d'informations importantes sur le modèle : les modèles calculés avec 2 capteurs espacés de 0.40m et 3 capteurs espacés de 0.20m sont pratiquement identiques.

En théorie, si le modèle est bien fixe dans le repère du véhicule, et que l'on ne prend que les capteurs gauche et milieu, on devrait observer exactement le même modèle qu'en utilisant les trois

capteurs espacés de 0.20m, avec deux dipôles forts situés 0.20m et 0.30m à droite du capteur milieu, et un dipôle moyen au-dessus du capteur gauche.

Pour se placer dans des conditions réelles où la position du véhicule par rapport aux capteurs ne sera pas connue a priori, le capteur le plus à gauche de la paire a été artificiellement déplacé à -0.1m sur Y, et le capteur le plus à droite à +0.1m sur Y. Voici ce que nous devrions alors théoriquement observer si l'on prend uniquement les signatures mesurées par le capteur gauche et milieu :

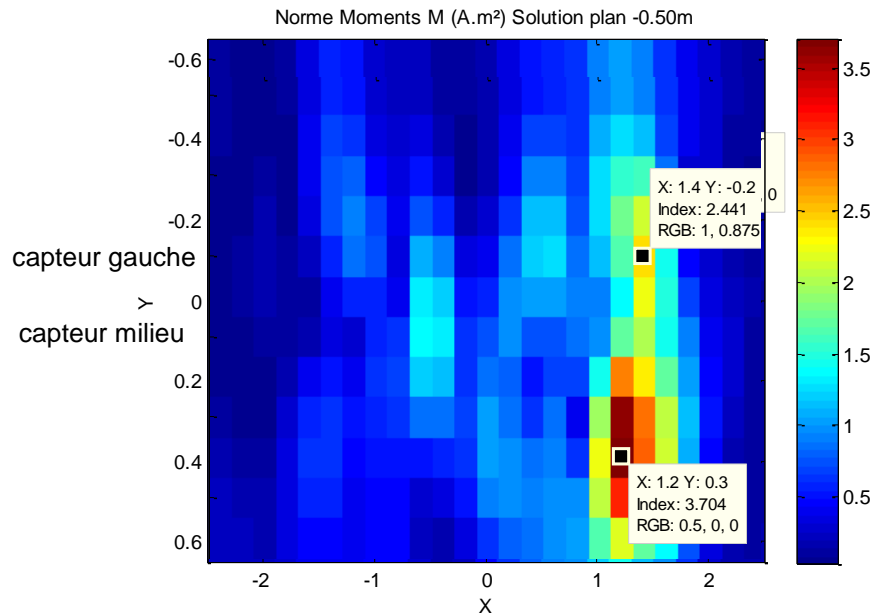


Figure 128 – Modèle dipolaire théorique obtenu à partir des signatures mesurées par les capteurs gauche et milieu espacés de 0.20m. Les dipôles sont espacés de 0.10m sur l'axe Y.

Et voici ce que nous devrions alors théoriquement observer si l'on prend uniquement les signatures mesurées par le capteur milieu et droit :

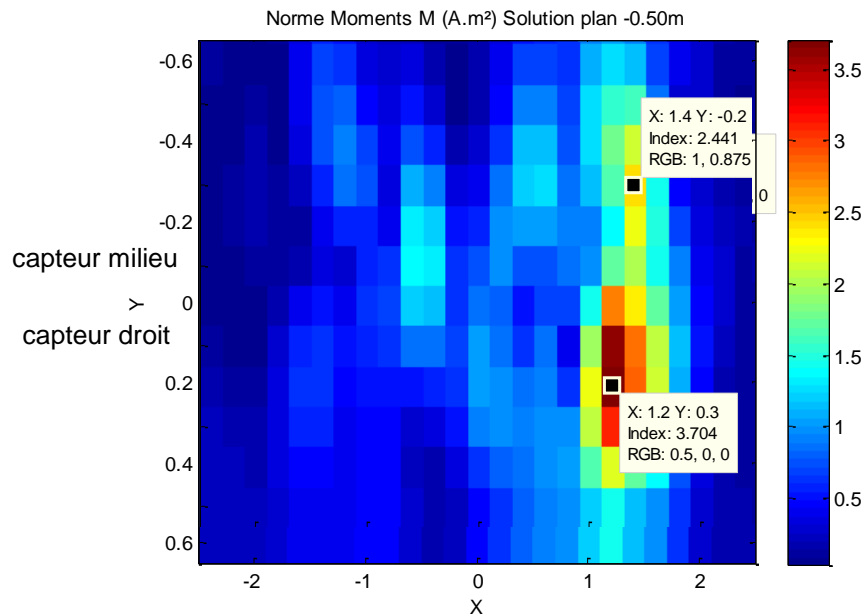


Figure 129 – Modèle dipolaire théorique obtenu à partir des signatures mesurées par les capteurs milieu et droit espacés de 0.20m. Les dipôles sont espacés de 0.10m sur l'axe Y.

Comparons ces résultats théoriques aux modèles calculés. Voici le modèle obtenu à partir des capteurs gauche et milieu :

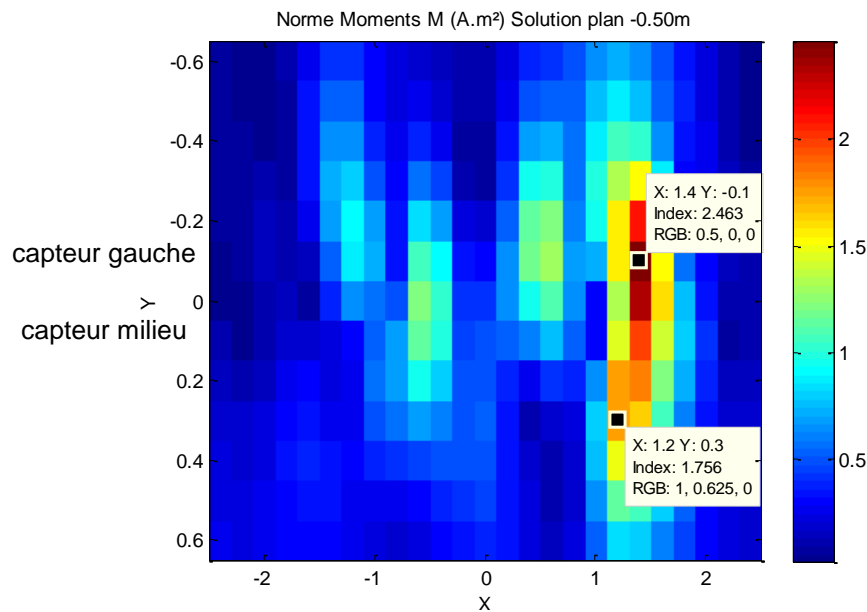


Figure 130 – Modèle dipolaire calculé à partir des signatures mesurées par les capteurs gauche et milieu espacés de 0.20m. Les dipôles sont espacés de 0.10m sur l'axe Y.

Nous retrouvons bien le dipôle moyen situé au-dessus du capteur gauche, avec une norme de moment magnétique de l'ordre de 2 A.m² : ce dipôle semble bien dépendant de la position du véhicule par rapport aux capteurs. Par contre, le fort dipôle attendu à 0.20-0.30m à droite du capteur milieu est présent mais très atténué : sa norme est divisée par deux.

Voici à présent le modèle obtenu à partir des signatures mesurées par le capteur milieu et droit :

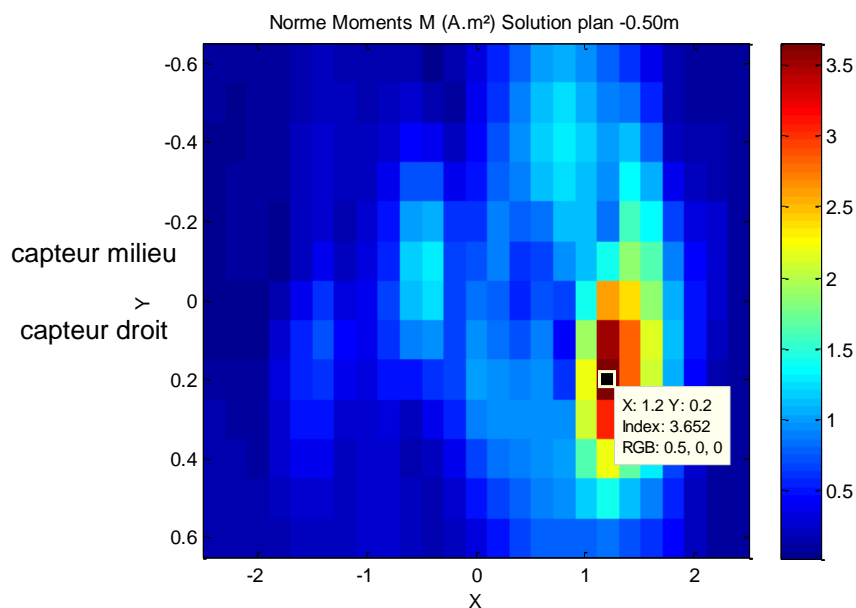


Figure 131 – Modèle dipolaire calculé à partir des signatures mesurées par les capteurs milieu et droit espacés de 0.20m. Les dipôles sont espacés de 0.10m sur l'axe Y.

Cette fois, nous retrouvons bien les forts dipôles situés au-dessus et à 0.10m à droite du capteur droit, avec une norme de moment magnétique de l'ordre de 4 A.m^2 : ce dipôle semble bien dépendant de la position du véhicule par rapport aux capteurs. Par contre, le dipôle moyen attendu à 0.20-0.30m à gauche du capteur milieu n'est pas visible.

N'utiliser que deux capteurs espacés de 0.20m sur les trois disponibles entraîne une perte d'information trop importante sur le modèle global du véhicule : les deux capteurs les plus à gauche modélisent la partie gauche du véhicule, et les deux capteurs les plus à droite modélisent la partie droite du véhicule. Si l'on s'attache à suivre la translation de dipôles particuliers, il semble bien que le modèle dipolaire soit attaché au repère du véhicule, mais l'observation du modèle dipolaire entier ne permet pas de l'affirmer.

Avec une configuration de capteurs défavorable de deux capteurs espacés de 0.20m, la simulation de décalage latéral Δy du véhicule avec les données de mars 2012 à notre disposition ne permet pas d'affirmer que le modèle dipolaire obtenu est bien lié au référentiel du véhicule. Une approche avec des signatures simulées à partir de quelques dipôles a donc été choisie, et est présentée dans le chap. VI.5.d.4 de ce mémoire.

IX. Bibliographie

- [ALT93] J.L.A. Altmann, and co. *Ground Vibration, Acoustic Waves and Magnetic Disturbances Produced by Land Vehicles of the North-Atlantic Treaty Organization. Results of the 1989 Measurements at Baumholder, FRG, Verification* - Research Reports, no. 3, Bochum: Brockmeyer, 1993.
- [ANA06] C.N.A. Anagnostopoulos, I.E. Anagnostopoulos, V. Loumos, and E. Kayafas. *A License Plate-Recognition Algorithm for Intelligent Transportation System Applications*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol.7 (No.3), pp. 377-391, Septembre 2006.
- [ARA12] B.N. Araghi, L.T. Christensen, R. Krishnan, and H. Lahrmann. *Application of Bluetooth Technology for Mode-Specific Travel Time Estimation on Arterial Roads: Potentials and Challenges*. Proceedings from the Annual Transport Conference at Aalborg University, 2012.
- [ARR07] ARRB Consulting, Le Trobe University. *Battery Life Analysis of the Sensys Wireless Vehicle Detection System*. Sensys White Paper. 2007
- [BEL08] P. Bellavista, A. Kupper, and S. Helal. *Location-Based Services: Back to the Future*. IEEE Pervasive Computing Magazine, vol.7 (No.2), Avril-Juin 2008.
- [BER94] D.J. Berndt and J. Clifford. *Using Dynamic Time Warping to Find Patterns in Time Series*. KDD Workshop, AAAI Press, pp. 359-370, 1994.
- [BLA79] R. Blanpain. *Traitement en temps réel du signal issu d'une sonde magnétométrique pour la détection d'anomalies magnétiques*. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1979.
- [BON09] S. Bonnet, C. Bassompierre, C. Godin, S. Lesecq, and A. Barraud. *Calibration Methods for inertial and magnetic sensors*. Sensors and actuators, [vol.156, Issue 2](#), pp. 302–311, Décembre 2009.
- [BRE73] S. Breiner. *Applications manual for portable magnetometers*, GeoMetrics, 1973.
- [BRI97] P. Brissonneau. *Magnétisme et matériaux magnétiques pour l'électrotechnique*. Edition Hermès, 1997.
- [CAR00] M.J. Caruso. *Applications of Magnetic Sensors for Low Cost Compass Systems*, Honeywell, 2000.
- [CAR99] M.J. Caruso, and L.S. Withanawasam, Honeywell Inc. Solid State Electronics Center. *Vehicle Detection and Compass Applications using AMR Magnetic Sensors*. Sensors Expo, Baltimore, 1999.

- [CAR96] Y. Caritu. *Système de Détection/Localisation de Mobile Ferromagnétique par un Réseau de Magnétomètres Haute Sensibilité*. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1996.
- [CAR95] Y. Caritu, B. Flament, F. Vacherand, et R. Blanpain. *Détection et localisation en temps réel d'un mobile ferromagnétique*. Quinzième colloque GRESTI, 1995.
- [CAS02] J.W. Casalegno. *All-Weather Vehicle Classification Using Magnetometer Arrays*, Proceedings of SPIE, vol. 4743, 2002.
- [CEM07] Conférence Européenne des Ministres des Transports. *Transports et émissions de CO2 : Quels progrès ? Document de synthèse*. OCDE, 2007.
- [CEN10] O. Paul-Dubois-Taine, Centre d'analyse stratégie, Gouvernement français. *Les nouvelles mobilités – Adapter l'automobile aux modes de vie de demain*. La documentation Française, 2010.
- [CER08] CERTU. *Les temps de parcours. Estimation, diffusion et approche multimodale*. Avril 2008.
- [CER07] CERTU, LCPC, J. Bertrand, S.S. Ieng, M. Pithon, et J. Rivault. *Mesure du temps de parcours par analyse de la signature électromagnétique des véhicules*. Octobre 2007.
- [CER04] CERTU, INRETS. *Matrices Origine-Destination en Milieu Interurbain*. Mai 2004.
- [CER99] CERTU. *PREDIT : DATA PLUS, Etude prospective dans le domaine du recueil de données de trafic*. Septembre 1999.
- [CHA12] S. Charbonnier, A.C. Pitton, and A. Vassilev. *Vehicle Re-identification With a Single Magnetic Sensor*. Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE International, pp. 380-385, 13-16 Mai 2012.
- [CHA11] S. Charbonnier. *Evaluation des performances de méthodes de ré-identification de véhicules à l'aide de leur signature magnétique en utilisant un unique capteur*. Rapport CEA, Septembre 2011.
- [CHA05] S. Charbonnier, C. Garcia-Beltan, C. Cadet, and S. Gentil. *Trends extraction and analysis for complex system monitoring and decision support*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 18 (No.1), pp. 21-36, 2005.
- [CHA02] O. Chadebec, J.L. Coulomb, J.P. Bongiraud, G. Cauffet, and P. Le Thiec. *Recent Improvements for Solving Inverse Magnetostatic Problem Applied to Thin Shells*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 38 (No. 2), Mars 2002.
- [CHA01] O. Chadebec. *Modélisation du champ magnétique induit par des tôles, Identification de l'aimantation, Application à l'immunisation en boucle fermée d'une coque ferromagnétique*. Thèse de doctorat de l'Institut National

Polytechnique de Grenoble, 2001.

- [CHE07]** S.Y. Cheung, and P. Varaiya. *Traffic Surveillance by Wireless Sensor Networks: Final Report*. California PATH (Partners for Advanced Transit and Highways) Program, Janvier 2007.
- [COI07]** B. Coifman, and S. Krishnamurthy. *Vehicle reidentification and travel time measurement across freeway junctions using the existing detector infrastructure*. Transportation Research Part C, pp. 135-153, 2007.
- [COM07]** Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. *Towards Europe-wide Safer, Cleaner and Efficient Mobility: The First Intelligent Car Report*. Octobre 2007.
- [DIN08]** H. Ding, G. Trajcevski, P. Scheuermann, X. Wang, and E. Keogh. *Querying and Mining of Time Series Data: Experimental Comparison of Representations and Distance Measures*. Proceedings of the VLDB Endowment, vol.1 (Issue 2), pp.1542-1552, Août 2008.
- [ERN10]** J.M. Ernst, J.V. Krogmeier, and D.M. Bullock. *Non-linear compensation of vehicle signatures captured from electromagnetic sensors with application to vehicle re-identification*. 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Septembre 2010.
- [EUR10]** Directive 2010/40/UE du Parlement Européen et du Conseil. *Concernant le cadre pour le déploiement de systèmes de transport intelligents dans le domaine du transport routier et d'interfaces avec d'autres modes de transport*. 7 juillet 2010.
- [EUR09]** Décision n°406/2009/CE du Parlement Européen et du Conseil. *Relative à l'effort à fournir par les Etats membres pour réduire leurs émissions de gaz à effet de serre afin de respecter les engagements de la Communauté en matière de réduction de ces émissions jusqu'en 2020*. 23 avril 2009.
- [FLA95]** B. Flament. *Détermination du dipôle équivalent à un véhicule : Partie rémanente et partie induite*, Rapport interne CEA, 1995.
- [FLA92]** B. Flament. *Système de Réduction de Bruit pour Réseaux de Magnétomètres Haute Sensibilité*. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1992.
- [FON02]** D. Fonade. *Compensation des perturbations magnétiques d'un porteur*. Diplôme de Recherche Technologique, 2002.
- [FUT11]** T.C. Fu. *A review on time series data mining*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 24, pp. 164-181, 2011.
- [FUT08]** T.C. Fu, F.L. Chung, R. Luk, and C.M. Ng. *Representing financial time series based on data point importance*. Engineering Applications of Artificial

Intelligence, vol. 21 (Issue 2), pp. 277-300, Mars 2008.

- [FUT01]** T.C. Fu, F.L. Chung, V. Ng, and R. Luk. *Pattern Discovery from Stock Time Series Using Self-Organizing Maps*. Proceedings of the 7th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining Workshop on Temporal Data Mining, pp. 27-37, 2001.
- [GOL98]** X. Golay, S. Kollias, G. Stoll, D. Meier, A. Valavanis, and Peter Boesiger. *A New Correlation-Based Fuzzy Logic Clustering Algorithm for fMRI*. Magnetic Resonance in Medicine, 40 (2), pp. 249-260, Août 1998.
- [GRA12]** M. Granger. *Analyse numérique en Master I, Chapitre II. Normes matricielles, conditionnement*. Cours de l'Université d'Angers, Faculté des Sciences 2, 2011-2012.
- [GRE07]** P. Grenet. *Mesure et compensation des perturbations magnétiques sur l'Ipaq HP 6915*, Rapport technique CEA, Novembre 2007.
- [HER09]** J.-C. Herrera, D. Work, X. Ban, R. Herring, Q. Jacobson and A. Bayen. *Evaluation of traffic data obtained via GPS-enabled mobile phones: the Mobile Century field experiment*. Transportation Research C, 18, pp. 568–583, 2010.
- [HON05]** Société Honeywell. *Vehicle Detection Using AMR Sensors*. Application Note – AN218, 2005.
- [HOS96]** M.Hoshino, Y. Gunji, S. Oho, and K. Takano. *A Kalman Filter to Estimate Direction for Automotive Navigation*. IEEE/SICE/RSJ International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pp. 145-150, Décembre 1996.
- [HSU11]** G.S. Hsu, P. Alexandra, J.C. Chen, F. Yeh, and M.H. Chen. *License Plate Recognition for Categorized Applications*. IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), 2011.
- [HUN99]** J. Hunter, and N. McIntosh. *Knowledge-Based Event Detection in Complex Time Series Data*. Joint European Conference on Artificial Intelligence in Medicine and Medical Decision Making, AIMDM'99, Lecture Notes in Computer Science, vol. 1620, pp. 271-280, Juin 1999.
- [IGA00]** H. Igarashi, T. Honma, and A. Kost. *Inverse Inference of Magnetization Distribution in Cylindrical Permanent Magnets*, IEEE Transactions on Magnetism, vol. 36 (No.4), Juillet 2000.
- [JAG07]** T. Jager. *Etat de l'art sur les microcapteurs de mouvement*. Rapport interne CEA, 2007.
- [KAO06]** W.W. Kao, and C.L. Tsai. *Adaptative and learning calibration of magnetic compass*. Measurement Science and Technology, vol.17, pp. 3073-3082, Août 2006.

- [KAT08]** Y.A. Kathawala, and B. Tueck. *The use of RFID for traffic management*. International Journal of Technology, Policy and Management, vol.8 (No.2), pp. 111-125, 2008.
- [KAV10]** R. Kavalier, K. Kwong, and A. Raman, Sensys Networks. *Arterial performance measurement with wireless magnetic sensors*. 89th Annual Meeting, Transportation Research Board. Janvier 2010.
- [KEO02]** E. Keogh, and S. Kasetty. *On the Need for Time Series Data Mining Benchmarks: A Survey and Empirical Demonstration*. Proceedings of the eighth ACM SIGKDD international conference on Knowledge discovery and data mining, pp.102-111, 2002.
- [KEO01]** E.J. Keogh, and M.J. Pazzani. *Derivative Dynamic Time Warping*. First SIAM International Conference on Data Mining, 2001.
- [KEO01-2]** E. Keogh, S. Chu, D. Hart, and M. Pazzani. *An Online Algorithm for Segmenting Time Series*. ICDM 2001, Proceedings IEEE International Conference on Data Mining, pp. 289-296, 2001.
- [KER03]** M. Kern, INRIA. *Problèmes inverses*. Cours de l'Ecole supérieure d'ingénieurs Léonard de Vinci, 2002-2003.
- [KHO11]** A. Khosravi, E. Mazloumi, S. Nahavandi, D. Creighton, and J.W.C. van Lint. *Prediction intervals to account for uncertainties in travel time prediction*. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on, vol.12 (No.2), pp. 357-547. Juin 2011.
- [KHO11-2]** V. Khorani, F. Razavi, and V.R. Disfani. *A mathematical model for urban traffic and traffic optimization using a developed ICA technique*. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on, vol.12, pp. 1024-1036. Décembre 2011.
- [KON08]** C. Konvalin. *Memsense Technical Document, Compensating for Tilt, Hard Iron and Soft Iron Effects*. Memsense, 2008.
- [KWO09]** K. Kwong, R. Kavalier, R. Rajagopal, and P. Varaiya. *A Practical Scheme for Arterial Travel Time Estimation based on Vehicle Re-identification Using Wireless Sensors*. Transportation Research Board, 89th Annual Meeting, Washington D.C., Janvier 2009.
- [LAN09]** J. Lan, and Y. Shi. *Vehicle Detection and Recognition Based on a MEMS Magnetic Sensor*. 4th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, pp. 404-408, Janvier 2009.
- [LAO96]** R. Lao, and D. Czajkowski. *Magnetoresistors for Automobile Detection and Traffic Control*. IEEE Sensors, Avril 1996.
- [LAW06]** L.A. Klein, M.K. Mills, and D.R.P. Gibson, Federal Highway Administration (FHWA). *Traffic Detector Handbook: Third Edition*. Octobre 2006.

- [LED08] G. Leduc. *Road Traffic Data: Collection Methods and Applications*. Technical Note, Joint Research Centre, European Commission. Novembre 2008.
- [LEG11] A. Le Goff. *Contrôle et diagnostic par un réseau de capteurs magnétiques en automobile*. Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, 2011.
- [LEG96] M. Legris. *Identification de l'état magnétique d'un système ferromagnétique à partir de mesures du champ proche*. Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1996.
- [LIA05] T.W. Liao. *Clustering of time series data – a survey*. Pattern Recognition, vol. 38 (Issue 11), pp. 1857-1874, Novembre 2005.
- [LOA76] E.P. Loane. *Speed and Depth Effects in Magnetic Anomaly Detection*. EPL Analysis, Memorandum, 1976.
- [MAD99] V.K. Madisetti, and D.B. Williams. *Digital signal processing Handbook*, CRC Press, 1999.
- [MAG] Société Magsys : <http://www.magsys.net/>
- [MAR78] S.V. Marshall. *Vehicle Detection Using a Magnetic Field Sensor*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. VT-27 (No.2), Mai 1978.
- [MCA77] A.D. McAulay. *Computerized Model Demonstrating Magnetic Submarine Localization*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-13 (No.3), Mai 1977.
- [MCF90] J.E. McFee, and Y.Das. *Locating and Identifying Compact Ferrous Objects*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 28 (No.2), Mars 1990.
- [MCF81] J.E. McFee, and Y. Das. *Determination of the Parameters of a Dipole by Measurement of its Magnetic Field*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. AP-29 (No.2), Mars 1981.
- [MER10] J. Merkisz, and R. Grzeszczyk. *Virtual Reality and Hardware In-the-Loop Testing Methods in the eCall In-Vehicle Module Research and Verification*. Advanced Microsystems for Automotive Applications 2010, Meyer – Valldorf, Springer, 2010.
- [MER03] L. Merlat, and P. Naz. *Magnetic localization and identification of vehicles*. Proceedings of SPIE, vol. 5090, pp. 174-185, 2003.
- [MER00] J.M.G. Merayo, P. Brauer, F. Primdahl, J.R. Petersen, and O.V. Nielsen. *Scalar calibration of vector magnetometers*. Measurement Science and Technology, vol. 11, no.2, pp. 120-132, 2000.
- [MOH11] M. Mohammadi, E. Molaei, and A. Naserasadi. *A Survey on Location based Services and Positioning Techniques*. Foundation of Computer

Science, 2011.

- [MSA09]** A. Msaed. *Micro capteur magnétique de mesure de courant et traitement intégré*. Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble, 2009.
- [NDO09]** M. Ndoeye, V. Totten, J.V. Krogmeier, and D.M. Bullock. *A Signal Processing Framework for Vehicle Re-identification and Travel Time Estimation*. 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Octobre 2009.
- [NUM]** Description du capteur Groundhog en 2005 : <http://www.ae-traffic.com/NuMetricsGroundhog.html> - La société Nu-metrics a depuis été reprise par Vaisala.
- [PET08]** D. Petit, et D. Maillet. *Techniques inverses et estimation de paramètres, Partie 1 et Partie 2*. Base documentaire de Mécanique Physique, Techniques de l'ingénieur, Janv. 2008.
- [PHA97]** T. Phan, B.W. Kwan, and L.J. Tung. *Magnetoresistors for Vehicle Detection and Identification*. Computational Cybernetics and Simulation, IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, vol.4, pp. 3839-3843, Octobre 1997.
- [PIT12]** A.C. Pitton, A. Vassilev, and S. Charbonnier. *Vehicle Re-identification With Several Magnetic Sensors*. Advanced Microsystems for Automotive Applications, Springer Berlin Heidelberg, pp. 281-290, 2012.
- [POL00]** S. Policker and A.B. Geva. *Nonstationary Time Series Analysis by Temporal Clustering*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part.B: Cybernetics, vol. 30 (No.2), Avril 2000.
- [QUI89]** A. Quinquis, et P. Latour. *Classification des signaux magnétiques TBF sous contrainte de décision*. Douzième colloque GRESTI, 1989.
- [RCC03]** Signature measurement standards group range commanders council. *Magnetic signature collection methodology standard*. Secretariat Range Commanders Council, Décembre 2003.
- [REM11]** S.M. Remias, A.M Hainen, S.R. Mitkey, and D.M. Bullock. *Probe Vehicle Re-Identification Data Accuracy Evaluation*. 18th World Congress on ITS, Orlando, Florida, Octobre 2011.
- [RES11]** R.A. Rescot. *Feasibility of Bluetooth Data as a Surrogate Analysis Measure of Traffic*. Thèse de doctorat de l'Université du Kansas, 2011.
- [RIP99]** P.Ripka. *Magnetic Sensors for Traffic Control*. ISMCR Tokyo, vol. 10, pp. 241-246, 1999.
- [RIT10]** Research and Innovative Technology Administration (RITA), U.S. Department of Transportation (US DOT). *ITS Unit Costs Database (as of 30 October 2010)*. Intelligent Transportation Systems, Joint Program Office,

www.itscosts.its.dot.gov

- [ROB00]** A. Robinet. *Conception et évaluation d'un dispositif magnétométrique et du procédé de traitement associé pour le contrôle de trafic routier*. Rapport de DRT, 2000.
- [ROD06]** J.P. Rodrigue, C. Comtois, and B. Slack. *The geography of transport systems*, 1st ed. London, Routledge, 2006.
- [SAN11]** R.O. Sanchez, C. Flores, R. Horowitz, R. Rajagopal, and P. Varaiya. *Vehicle Re-identification Using Wireless Magnetic Sensors: Algorithm Modifications and Performance Analysis*. IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES), pp. 226-231, Juillet 2011.
- [SCH12]** B. Schmid, M. Zalewski, U. Stählin, K. Rink, S. Günthner, Continental. *Lane Accurate Position Sensing of Vehicles for Cooperative Driver Assistance Systems*. Advanced Microsystems for Automotive Applications 2012, Meyer, Springer, 2012.
- [SCH12-2]** E. Schoitsch et al. *Lane-Sensitive Positioning and Navigation for Innovative ITS Services*. Advanced Microsystems for Automotive Applications 2012, Meyer, Springer, 2012.
- [SCH06]** L.A. Schmerber. *Identification et caractérisation de sources électromagnétiques. Application à la discrétion des moteurs de propulsion navale*. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.
- [SEN12]** Sensys Networks. *VSN2040 Wireless Magnetometer Sensor Installation Guide*. P/N 152-240-100-001, Rev H, Octobre 2012.
- [SEN08]** Sensys Networks. *The Sensys Wireless Vehicle Detection System, Advanced Technology for 21st Century Traffic Management, System Overview*. 2008.
- [SEN08-2]** A. Haoui, R. Kavalier, and P. Varaiya, co-fondateurs de Sensys. *Wireless magnetic sensors for traffic surveillance*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, vol. 16, issue 3, pp. 294-306, Juin 2008.
- [STE]** Société Steral : <http://www.sterela.fr/systemes-electroniques.asp>
- [VAI]** Société Vaisala : <http://www.vaisala.com/en/roads/Pages/default.aspx>
- [VDC07]** The Vehicle Detector Clearinghouse. *A summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies used in Intelligent Transportation Systems*. Southwest Technology Development Institute, Federal Highway Administration's Intelligent Transportation Systems Program Office, Août 2007.
- [VUI08]** Y. Vuillermet. *Immunisation en boucle fermée – Application au sous-marin double coque, Identification de l'aimantation à partir de mesures du champ*

magnétique. Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.

[WAH10]

N. Wahlström, J. Callmer, and F. Gustafsson. *Magnetometers for tracking metallic targets*. 13th Conference on Information Fusion (FUSION), Juillet 2010.

[WHI89]

L.A. Whitcomb. *Sensor Compensation for Vehicle Magnetic Signatures*. IEEE AES Magazine, Février 1989.

[WIK84]

J.P. Wikswo, and K.R. Swinney. *A comparison of scalar multipole expansions*. Journal of Applied Physics, American Institute of Physics, vol.56, pp.3039-3049, 1984.

[YON09]

J.P. Yonnet. *Cours d'Electromagnétisme des matériaux durs*. Ecole d'ingénieurs Ense3, 2009-2010.

[YUM11]

M. Yu, D. Zhang, Y. Cheng, and M.S. Wang. *An RFID electronic tag based automatic vehicle identification system for traffic iot applications*. Control and Decision Conference, 2011.

Contributions à la ré-identification de véhicules par analyse de signatures magnétiques tri-axiales mesurées par une matrice de capteurs

Résumé

La ré-identification de véhicules permet d'estimer deux paramètres clés en gestion dynamique de trafic : les temps de parcours et les matrices origine-destination. Dans cette thèse, nous avons choisi d'effectuer cette ré-identification par analyse des signatures magnétiques mesurées par des capteurs tri-axiaux placés sur la chaussée. La signature magnétique est générée par l'aimantation du véhicule : elle est alors susceptible de varier en fonction de l'orientation du véhicule par rapport au champ magnétique terrestre (à cause de l'aimantation induite dans le plan horizontal), et en fonction de sa position latérale relative par rapport aux capteurs. Les expérimentations que nous avons menées nous ont permis d'obtenir une base de données de signatures magnétiques, et ainsi d'évaluer les performances des deux méthodes de ré-identification que nous avons élaborées.

La première méthode consiste à comparer directement des paires de signatures magnétiques mesurées par les capteurs. Les calculs de distances entre les paires sont effectués avec des algorithmes classiques comme la distance euclidienne. Les résultats obtenus sont très bons, et baissent peu lorsque le véhicule change d'orientation. Toutefois, ils sont très sensibles à la déformation des signaux due au décalage latéral du véhicule, et nécessitent donc de positionner un capteur tous les 0.20m sur toute la largeur de la voie.

Dans un second temps, nous proposons une méthode de ré-identification qui compare des paires de modèles magnétiques de véhicules. Ces modèles sont composés de plusieurs dipôles, et sont calculés à partir des signatures mesurées. La modélisation a pour but de s'affranchir du décalage latéral du véhicule, en remontant à la position relative du véhicule par rapport aux capteurs. Avec deux fois moins de capteurs que la méthode précédente, les résultats obtenus sur signaux réels sont également très bons, même s'ils sont un peu plus sensibles au changement d'orientation du véhicule. De plus, une simulation nous permet d'extrapoler qu'il est effectivement possible de s'affranchir du décalage latéral avec cette méthode.

Mots-clés : Ré-identification de véhicules, Capteur magnétique, Distances temporelles, Modélisation magnétique, Aimantation induite, Gestion de trafic

Contributions to vehicles re-identification by an analysis of magnetic signatures measured with a matrix of three-axis magnetic sensors

Abstract

Vehicle re-identification gives access to two essential data for dynamic traffic management: travel times and origin-destination matrices. In this thesis, we chose to re-identify vehicles by analysing their magnetic signatures measured with several 3-axis magnetic sensors located on the road. A magnetic signature is created by the vehicle magnetization. Therefore, the vehicle orientation to the Earth's magnetic field (which determines the induced magnetization) and the variation of the lateral position of the vehicle relative to the sensors' one might both have an impact on the magnetic signature. We gathered our experiments' results into a database of magnetic signatures that we used to evaluate the performances of the two vehicle re-identification methods we developed.

The first method is a direct comparison of pairs of magnetic signatures measured by the sensors. Distances between pairs of signatures are computed using classic algorithms such as the Euclidean distance. This method's results are very positive and the vehicle change of orientation has only a slight impact on them. However, the distortion of signals due to a lateral offset in the vehicle position has a strong impact on the results. As a consequence, sensors have to be placed every 0.20m over the road's entire width.

The second proposed method compares pairs of vehicles' magnetic models. Those models are composed of several magnetic dipoles and are determined from the measured signatures. Magnetic modelling aims to suppress the influence of the vehicle lateral position on the results by assessing the relative position of the vehicle above the sensors. Although the vehicle orientation has slightly more impact on the performances than with the first method, the overall results are more promising. This method also allows us to divide by two the number of sensors used.

Keywords: Vehicle re-identification, Magnetic sensor, Temporal distances, Magnetic Modelling, Induced magnetization, Traffic management



CEA / LETI
Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives
17 rue des Martyrs – 38054 Grenoble CEDEX 9 – France

